



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ

DESIGN OF LINE-START SYNCHRONOUS MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Iveta Fajmonová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Studentka: Iveta Fajmonová

ID: 186056

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě literární rešerše popište synchronní stroje spouštěné ze sítě a jejich návrhový postup.
2. Namodelujte zadaný asynchronní motor v programu RMXprt.
3. Navrhnete synchronní motor spouštěný ze sítě s využitím statoru zadaného asynchronního motoru a úpravou jeho rotoru.
4. Parametry navrženého stroje ověřte v programu RMXprt a ANSYS Maxwell.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcova "Design of Rotating Electrical Machines" John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B)
- [2] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [3] Juha Pyrhonen, Valeria Hrabovcova, R. Scott Semken „Electrical Machine Drives Control: An Introduction“ Wiley, November 2016, ISBN: 978-1-119-26045-5

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Bárta, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

FAJMONOVÁ, I. *Návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Bárta, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě* jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 28. května 2018

.....

ABSTRAKT

V dnešní době je kladen čím dál větší důraz na snižování spotřeby elektrické energie, proto je tématem této práce synchronní motor spouštěný ze sítě, který by mohl být vhodnou náhradou za asynchronní motor. Asynchronní motor se velkou měrou podílí na spotřebě elektrické energie, neboť je hojně užívaný díky své nízké pořizovací ceně. Protože u AM lze zvyšovat účinnost jen velmi těžko, navrhuje tato práce jejich náhradu synchronním strojem spouštěným ze sítě. Práce popisuje LSPMSM a porovnává jeho vlastnosti s AM. Obsahem práce je také návrh synchronního stroje spouštěného ze sítě, který vychází z již navrženého asynchronního motoru. V poslední kapitole je tento navržený synchronní stroj spouštěný ze sítě analyzován pomocí programů RMxpert a Maxwell.

KLÍČOVÁ SLOVA:

synchronní motor spouštěný ze sítě, asynchronní motor, klec nakrátko, permanentní magnety, návrh, RMxpert, Maxwell

ABSTRACT

This thesis deals with line-start permanent magnet synchronous motor, because in these days the world focuses on energy saving more than ever. Line-start permanent magnet motors represents a possible replacement for asynchronous motors, which are the most used kind of motors and constitute one of the greatest energy consumption apparatuses in the world. The efficiency improvement of induction motors is usually achieved through design optimization of induction motors resulting in limited degrees of success. This thesis also thoroughly explains LSPMSM topology and compares properties of the line-start permanent magnet motors and asynchronous motors. This thesis deals with the design of line-start permanent magnet synchronous motor based on previously designed asynchronous motor. In the last chapter LSPMSM is investigated in RMxpert and Ansys Maxwell.

KEY WORDS

line-start permanent magnet synchronous motor, asynchronous motor, squirrel cage, permanent magnet, design, RMxpert, Maxwell

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Bártovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Také bych chtěla poděkovat svému snoubenci Ing. Martinu Lolovi, jeho mamince Jitce Lolové a mé rodině za veškerou podporu v průběhu celého mého dosavadního studia.

V Brně dne 28. května 2018

Iveta Fajmonová

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	2
SEZNAM TABULEK.....	4
1 ÚVOD.....	5
2 SYNCHRONNÍ STROJE SPOUŠTĚNÉ ZE SÍTĚ.....	6
2.1 HISTORIE.....	6
2.2 PROVEDENÍ STROJE	6
2.3 PRINCIP ČINNOSTI.....	8
2.3.1 ASYNCHRONNÍ ROZBĚH A SKOK DO SYNCHRONNÍHO STAVU.....	8
2.3.2 SYNCHRONNÍ STAV.....	10
2.4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	12
2.4.1 PŘEHLED PROVEDENÍ.....	12
2.4.2 VLASTNOSTI SOUČASNÝCH STROJŮ V POROVNÁNÍ S INDUKČNÍM MOTOREM	14
2.5 ANALYTICKÝ NÁVRH STROJE.....	16
2.5.1 METODOLOGIE NÁVRHU LSPMSM.....	16
2.5.2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH INDUKČNÍHO STROJE.....	17
3 MODEL ZADANÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE	19
3.1 KLÍČOVÉ PARAMETRY ZADANÉHO STROJE	19
3.2 VÝPOČET ZADANÉHO STROJE V RMXprt.....	19
4 NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ.....	21
4.1 ÚPRAVA KLECE ROTORU A VOLBA VELIKOSTI MAGNETŮ	21
5 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NAVRŽENÉHO STROJE V RMXprt A MAXWELL	23
5.1 STAV NAPRÁZDNO.....	25
5.2 STAV PŘI JMENOVITÉM VÝSTUPNÍM VÝKONU	29
5.3 ROZBĚH STROJE	34
5.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH V RMXprt A MAXWELL.....	36
6 ZÁVĚR.....	38
POUŽITÁ LITERATURA	40
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Merrillův motor [18]</i>	6
<i>Obr. 2.2 řez LSPMSM</i>	7
<i>Obr. 2.3 Dva typy rotorů: a) rotor s vnořenými PM, b) rotor s PM na povrchu [1]</i>	8
<i>Obr. 2.4 Momenty působící při rozběhu [3]</i>	9
<i>Obr. 2.5 Průběhy momentů na základě předchozích rovnic [7]</i>	11
<i>Obr. 2.6 Momentová charakteristika s vyznačeným kritickým skluzem a maximálním momentem [7]</i>	11
<i>Obr. 2.7 Schopnost dosáhnout synchronizace [14]</i>	12
<i>Obr. 2.8 Konfigurace rotorů s vnořenými magnety pro LSPMSM: (a) Rotor s radiálně uloženými magnety, (b) Sériový typ uložení magnetů, (c) U-typ uložení magnetů, (d) V-typ uložení magnetů, (e) W-typ uložení magnetů, (f) Svastika-typ uložení magnetů, [1]</i>	13
<i>Obr. 2.9 Porovnání vlastností jednotlivých typů rotorů z obr. 2.8 [16]</i>	13
<i>Obr. 2.10 Rozdělení ztrát v indukčním motoru [3]</i>	14
<i>Obr. 2.11 Algoritmus návrhu LSPMSM [1]</i>	16
<i>Obr. 3.1 Model výchozího asynchronního motoru v RMxprt</i>	19
<i>Obr. 4.1 Rozměry: a) původní rotorové drážky v RMxprt, b) nové rotorové drážky v RMxprt</i>	21
<i>Obr. 5.1 Model synchronního motoru spouštěného ze sítě v RMxprt</i>	23
<i>Obr. 5.2 Momentová charakteristika LSPMSM</i>	24
<i>Obr. 5.3 Rozložení magnetické indukce s vyznačenými siločárami v řezu stroje pro stav naprázdno</i>	25
<i>Obr. 5.4 Indukované sdružené napětí naprázdno na jednotlivých fázích</i>	26
<i>Obr. 5.5 Indukované fázové napětí naprázdno na jednotlivých fázích</i>	26
<i>Obr. 5.6 FFT – analýza fázového indukovaného napětí naprázdno</i>	27
<i>Obr. 5.7 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře</i>	28
<i>Obr. 5.8 FFT – analýza radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře</i>	28
<i>Obr. 5.9 Parazitní reluktanční moment</i>	29
<i>Obr. 5.10 Rozložení magnetické indukce s vyznačenými siločárami v řezu stroje pro stav při jmenovitém výkonu</i>	30
<i>Obr. 5.11 Rozložení ztrát ve stroji</i>	31
<i>Obr. 5.12 Průběh ztrát ve stroji v ustáleném stavu</i>	32
<i>Obr. 5.13 Průběh proudu na jednotlivých fázích v ustáleném stavu</i>	32
<i>Obr. 5.14 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře</i>	33

<i>Obr. 5.15 FFT – analýza magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5.16 Průběh otáček stroje při rozběhu stroje.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5.17 Průběh momentu při rozběhu stroje.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5.18 Průběhy proudů na jednotlivých fázích při rozběhu stroje.....</i>	<i>35</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Porovnání indukčních a LSPMS motorů [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3.1 Parametry asynchronního motoru</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 3.2 Vypočtené hodnoty v RMxpřt</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 3.3 Rozdělení ztrát v AM vypočtených v RMxpřt a uvedených v technické dokumentaci...20</i>	
<i>Tab. 5.1 Vypočtené hodnoty v RMxpřt</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 5.2 Rozdělení ztrát v LSPMSM vypočtených v RMxpřt.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 5.3 Hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech stroje (viz obr. 5.3)</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 5.4 Parametry vypočtené v programu Maxwell a RMxpřt</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5.5 Hodnoty při jmenovitém výstupním výkonu</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5.6 Rozdělení ztrát v LSPMSM vypočtených v programu Maxwell.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5.7 Porovnání hodnot při jmenovitém výstupním výkonu z RMxpřt a Maxwell.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5.8 Porovnání hodnot při stavu naprázdno z RMxpřt a Maxwell</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5.9 Porovnání ztrát při jmenovitém výstupním výkonu z RMxpřt a Maxwell</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6.1 Porovnání hodnot při jmenovitém výstupním výkonu z Maxwell a technické dokumentace původního asynchronního motoru</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6.2 Porovnání ztrát při jmenovitém výstupním výkonu z Maxwell a technické dokumentace původního asynchronního motoru</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6.3 Porovnání hodnot navrženého LSPMSM s motory SEW a WEG.....</i>	<i>41</i>

1 Úvod

V dnešní době je kladen stále větší důraz na snižování spotřeby elektrické energie z ekonomických a klimatických důvodů. Elektromotory se podílí na spotřebě elektrické energie vysokou měrou, proto jednou z možných cest, jak docílit snížení spotřeby elektrické energie, je zvyšování účinnosti těchto elektromotorů.

Protože dříve byly pohony s asynchronním motorem vhodnou volbou pro většinu aplikací, díky nízkým výrobním nákladům, jednoduché výrobě, robustní konstrukci a uspokojivým vlastnostem, představují asynchronní motory nejužívanější skupinu z elektrických motorů. Z tohoto důvodu jsou AM významnými spotřebiteli elektrické energie. Poněvadž zvyšování účinnosti lze u klasického provedení asynchronního motoru s kotvou nakrátko už jen velmi těžko, je nutné jej nahradit jiným typem.

Jednou z variant je synchronní stroj spouštěný ze sítě, který je v anglické literatuře označován Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor (LSPMSM). Ve druhé kapitole této práce je bližší seznámení s tímto typem stroje, jeho porovnání s asynchronním motorem a stručný popis analytického návrhu tohoto stroje. Celá druhá kapitola čerpá z autorovy semestrální práce [2].

Dále se tato práce věnuje návrhu konkrétního LSPMSM, pro který byl jako výchozí stroj vybrán asynchronní stroj s klecí na krátko s výkonem 1,5 kW. Ve třetí kapitole je z tohoto důvodu tento asynchronní motor analyzován v programu RMxpert. V následující čtvrté kapitole jsou popsány úpravy, které byly provedeny na rotoru tak, aby byly zachovány rozběhové vlastnosti původního stroje, především úprava rozměrů klece původního stroje a volba magnetů.

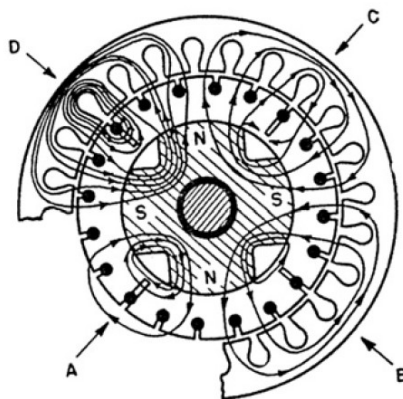
Poslední kapitola se zabývá analýzou navrhnutého synchronního stroje spouštěného ze sítě. Nejdříve je stroj namodelován v programu RMxpert, ve kterém je vypočtena momentová charakteristika stroje. Poté jsou pro stav naprázdno v Maxwellovi vypočteny průběhy indukovaného napětí naprázdno a magnetické indukce ve vzduchové mezeře, které jsou poté dále analyzované v Matlabu. Stejným způsobem jsou analyzovány rozběhové charakteristiky a stroj při zatížení.

2 SYNCHRONNÍ STROJE SPOUŠTĚNÉ ZE SÍTĚ

2.1 Historie

V roce 1950 již byly déle známy generátory s PM, ale přesto nejsou známy žádné zmínky o LSPMSM. První LSPMSM navrhl v roce 1955 F. W. Merrill, tento motor je vyobrazen na obr. 2.1. V té době ovšem byly permanentní magnety vyráběny z feritů a slitin AlNiCo. Oba tyto materiály měly velmi špatné vlastnosti. Slitiny AlNico se vyznačovaly malou koercitivní silou H_c a nízkou teplotní stabilitou, zatímco feritové magnety byly vysoce křehké a měly nízkou magnetickou remanenci B_r . Kvůli takovým neuspokojivým vlastnostem nebylo perspektivní se tomuto stroji dále věnovat.

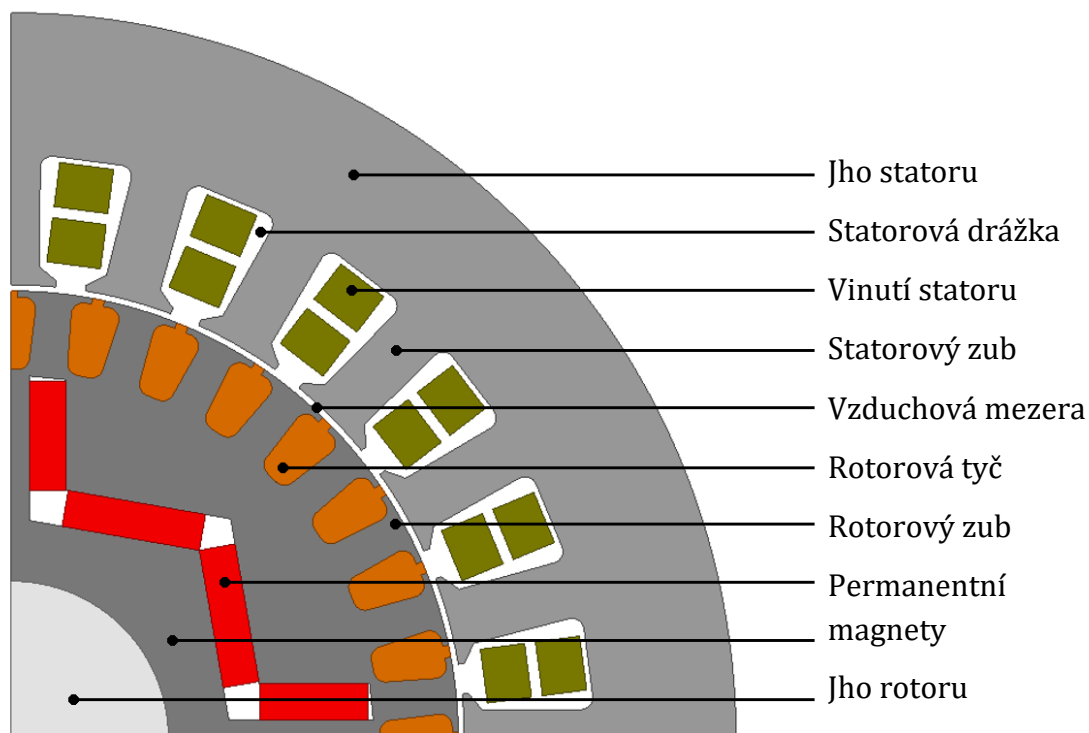
Velký průlom nastal v začátcích devadesátých let minulého století, kdy byly vyvinuty vysoce výkonné magnety ze vzácných zemin. Neodymové magnety NdFeB umožnily návrh motorů s vysokou účinností a celkově dobrými vlastnostmi. Díky tomu opět vzrostl zájem o výzkum LSPMSM. Během osmdesátých a devadesátých let vznikly mnohé vědecké práce na toto téma. Začalo se zkoumáním chování stroje v ustáleném stavu a poté bylo potřeba vyřešit také přechodné stavy. Ty byly v 80. letech zkoumány pomocí analytického modelu založeného na d- a q-osách. Na konci 90. let již bylo možné tyto problémy zkoumat pomocí metody konečných prvků. Problémem byla ovšem stále složitá výroba a vysoká cena PM. Podrobnější přehled zkoumání LSPMSM je uveden v [18].



Obr. 2.1 Merrillův motor [18]

2.2 Provedení stroje

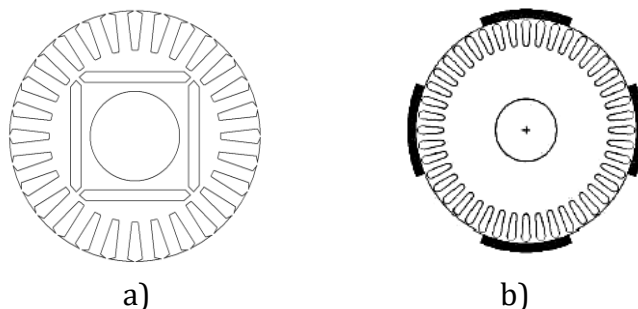
Hlavní idea vytvoření LSPMSM bylo vytvoření stroje, který by měl vyšší účinnost než asynchronní motor, podobně jako synchronní motor a zároveň odpadla potřeba měniče, který je poměrně drahý. Za tímto účelem došlo k jisté kombinaci AM a SM s využitím dobrých vlastností z obou uvedených. Ze synchronního motoru má lepší vlastnosti v ustáleném chodu než u AM, ale zároveň se dokáže, stejně jako AM, rozběhnout z přímého připojení na síť bez potřeby frekvenčního měniče. Z těchto důvodů LSPMSM je velmi podobný stavbou asynchronnímu motoru [3].



Obr. 2.2 řez LSPMSM

Stator je stejný jako u indukčního motoru. Ovšem rozdíl nastává u rotoru stroje. Rotor má stejně jako u AM klec nakrátko, která vytváří záběrný moment, ale navíc rotor obsahuje permanentní magnety, které se uplatňují v synchronním provozu. Tyto permanentní magnety vytvářejí vždy sudý počet pólů, přičemž se nejčastěji jedná o čtyřpólový stroj. Z hlediska magnetů rozlišujeme dva typy: rotor s vnořenými magnety a rotor s magnety na povrchu [3], viz obr. 2.3.

Pokud jsou PM uloženy uvnitř rotoru, musí zde být dostatečné místo pro jejich uložení. Toho lze docílit zmenšením průměru hřídele, zvětšením vnějšího průměru rotoru nebo zmenšením výšky klece. Uložení PM v rotoru lépe zabraňuje demagnetizaci magnetů díky ochraně klecí. U rotoru s PM na povrchu je hlavní výhoda v jednodušší výrobě. Navíc tento typ poskytuje větší synchronní moment než rotor s vnořenými PM, díky menší vzdálenosti mezi PM a vinutím statoru. Menší vzdálenost vede k menším ztrátám magnetického toku a ve vzduchové mezeře je proto větší hustota toku než u rotoru s vnořenými permanentními magnety, která vede k většímu výstupnímu momentu. Na druhou stranu větší hustota magnetického toku ve vzduchové mezeře má za následek zvětšení parazitního reluktančního momentu, což způsobuje vibrace a hluk během spouštění stroje i při jeho synchronním chodu. PM na povrchu rotoru taktéž budí větší U_0 a tudíž, jak bude vysvětleno v kapitole 2.3.1 větší brzdný moment. Z tohoto důvodu bude stroj dosahovat delší dobu synchronního stavu, než kdyby byly PM uloženy uvnitř rotoru. Navíc protože rotor s PM uvnitř rotoru vytváří větší reluktanční moment v synchronním stavu, proud statorovým vinutím je v ustáleném stavu menší než u rotoru s PM na povrchu při stejné zátěži. Z toho plyne, že stroj s magnety uloženými uvnitř rotoru má vyšší účinnost [1] [3].



Obr. 2.3 Dva typy rotorů: a) rotor s vnořenými PM, b) rotor s PM na povrchu [1]

Drážky rotoru musí být dostatečně hluboké, aby byl překonán brzdňý moment vytvářený permanentními magnety. Klec může nabývat různých tvarů a velikostí [1] [3].

2.3 Princip činnosti

Provoz u LSPMSM, pracujícího na síti konstantního napětí a frekvence, jde rozdělit na tři dobře rozlišitelné provozní stavy a to: asynchronní rozběh, přechod (skok) do synchronního stavu a ustálený synchronní stav. Nejkritičtější fáze je skok do synchronního stavu [4].

2.3.1 Asynchronní rozběh a skok do synchronního stavu

Rozběh je v podstatě stejný jako u asynchronního stroje. Statorové vinutí je připojeno na síť, nejčastěji třífázovou, a vytváří točivé magnetické pole. Toto točivé magnetické pole protíná vodiče rotoru, takže se v nich indukuje napětí, a protože jde o klec nakrátko, protéká jí i proud, který vytváří magnetické pole rotoru. Vzájemným působením magnetických polí rotoru a statoru vzniká síla působící na vodiče rotoru ve směru pohybu magnetického pole statoru [8].

Hodnota vstupního napětí určuje rychlost rozběhu stroje, přičemž platí, že s vyšší hodnotou napětí, je rozběh rychlejší. U příliš velkého odporu rozběhové klece hrozí, že motor vůbec nedosáhne synchronních otáček [3].

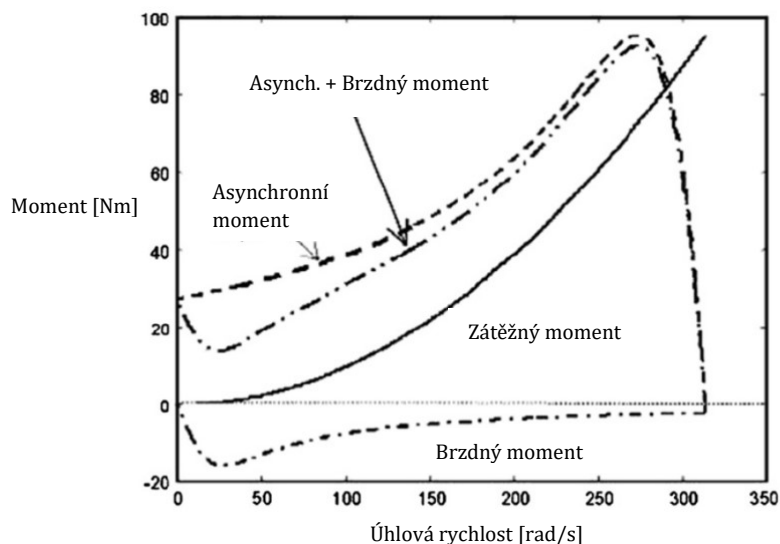
Při rozběhu vznikají dva momenty, tedy již popsany záběrný moment od klece a brzdňý moment, který působí proti záběrnému momentu od klece. Brzdňý moment je zde díky přítomnosti PM, které v statorovém vinutí generují proud a s ním spojené přídatné ztráty, které generují brzdňý moment. Brzdňý moment je závislý na skluzu. Skluz u LSPMSM definujeme stejným způsobem jako u AM, tedy jako rozdíl otáček n_1 a n , stažených na otáčky točivého magnetického pole statoru [4].

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.1)$$

Otáčky magnetického pole statoru závisí na počtu pólových dvojic stroje a kmitočtu napájecího napětí.

$$n_1 = 60 \cdot \frac{f_1}{p} \quad (2.2)$$

V obrázku 2.4 lze vidět, že brzdňý moment dosahuje maxima při malých otáčkách a jak se skluz blíží k nule, tak brzdňý moment skoro zaniká [14] [1]. Tento brzdňý moment kromě brzdňého účinku vyvolává i pulzační moment, ale protože rozběh trvá většinou relativně krátkou dobu, nemusíme se tím podrobně zabývat. Důležitá je velikost tohoto brzdňého momentu, neboť pokud by byl příliš velký, stroj by se nemohl vůbec rozběhnout nebo by nedošlo k přeskoku do synchronizmu [2] [4] [7].



Obr. 2.4 Momenty působící při rozběhu [3]

Pro výpočet velikosti brzdňého momentu je nutné znát indukované napětí naprázdno U_0 (v anglické literatuře označováno: back-EMF), které ve statorovém vinutí indukují PM uložené v rotoru s frekvencí [7]:

$$f = n \cdot p \quad (2.3)$$

Tato frekvence je odlišná od statorové frekvence f_s , tak dlouho dokud není dosaženo synchronních otáček.

$$U_0 = \frac{\omega \cdot \psi_{PM}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Toto napětí způsobuje přídavný statorový proud I_b , limitovaný pouze impedancí statorového vinutí, pokud na statorové straně není přítomné jiné napětí o stejné frekvenci. Tento proud budí přídavný magnetický tok ve vzduchové mezeře – který společně s magnetickým tokem od PM v rotoru – vytváří brzdňý moment M_b [7].

$$M_b = \frac{mpR_s(1-s) \cdot U_0^2}{2 \cdot \omega_{syn}} \cdot \frac{R_s^2 + X_q^2(1-s)^2}{(R_s^2 + X_qX_d(1-s)^2)^2} \quad (2.5)$$

Kde s je skluz, m je počet fází, R_s odpor statorového vinutí, ω_{syn} je synchronní rychlost, U_0 je indukované napětí naprázdno, X_d a X_q jsou synchronní reaktance v d- a q-ose. Z rovnice (2.7) je patrné, že brzdňý moment je výrazně závislý na elektromagnetické síle generované

permanentními magnety. Při synchronních otáčkách je skluz roven nule, a pokud platí, že $R_s \ll X_d$, potom můžeme zjednodušit vztah na [7]:

$$M_b = \frac{U_0^2 \cdot R_s}{X_q X_d} \quad (2.6)$$

Moment od asynchronní klece motoru je vyjádřen následovně [4]:

$$M = \frac{3U_s^2 \left(\frac{R_D}{s}\right)}{\frac{\omega_s}{p} \left[\left(R_s + \frac{R_D}{s}\right)^2 + (X_{rs} + X_{rD})^2 \right]} \quad (2.7)$$

2.3.2 Synchronní stav

Jakmile se při rozběhu otáčky přiblíží synchronním otáčkám, vznikají mezi rotorem a statorem takové vzájemné momentové účinky, které mohou způsobit skok motoru do synchronního chodu. Ovšem pokud na rotor působí pouze moment od klece a zátěžný moment, potom moment způsobený třením bude bránit skoku motoru do synchronismu a motor bude pracovat se skluzem s . Jestliže při nízkém skluzu, nižším než kritický skluz, působí na rotor také síly od permanentních magnetů nebo reluktanční moment, je poté rotor vtažen do synchronismu. V tomto stavu je skluz roven nule, asynchronní moment, tj. moment od klece rotoru, vymizí a stroj pracuje jako synchronní motor s permanentními magnety. Výsledný moment se skládá ze dvou složek, a to synchronního momentu a reluktančního momentu, jak ukazuje obrázek 2.5. Většina momentu je tvořena synchronním momentem, jelikož u LSPMSM bývá reluktanční moment malý [1] [4] [7]. Synchronní moment je vyjádřen:

$$M_{syn} = \frac{p \cdot m}{\omega_s} \cdot \frac{U_s U_0}{X_d} \cdot \sin \vartheta \quad (2.8)$$

Kde $\sin \vartheta$ je zátěžný úhel. Jelikož $X_d \neq X_q$ je přítomen také reluktanční moment:

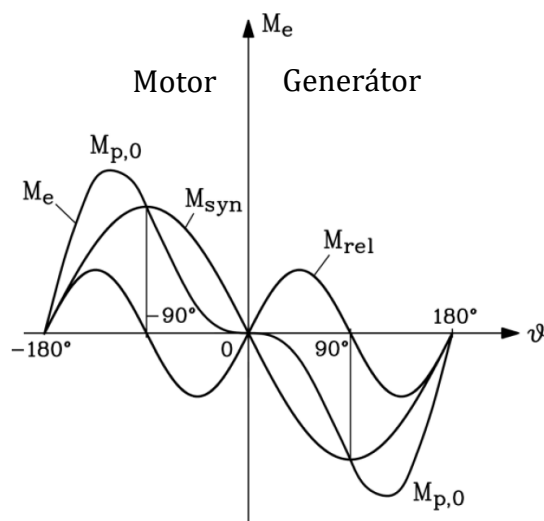
$$M_{rel} = \frac{p \cdot m}{\omega_s} \cdot \frac{U_s^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \quad (2.9)$$

Potom výsledný elektromagnetický moment je:

$$M_e = \frac{p \cdot m}{\omega_s} \cdot \left(\frac{U_s U_0}{X_d} \cdot \sin \vartheta + \frac{U_s^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\vartheta \right) \quad (2.10)$$

Rovnice (2.12) pro kritický skluz vychází z Newtonova zákona pro výpočet pohybu rotoru s rotorovým úhlem γ_r závisí na celkové setrvačnosti roztáčené hmoty $J = J_{mot} + J_{zát}$ a rozdílu elektromagnetického a zátěžného momentu [7].

$$\frac{J_{mot} + J_{zát}}{p} \cdot \frac{d^2 \gamma_r}{dt^2} = M_e - M_{zát} \quad (2.11)$$



Obr. 2.5 Průběhy momentů na základě předchozích rovnic [7]

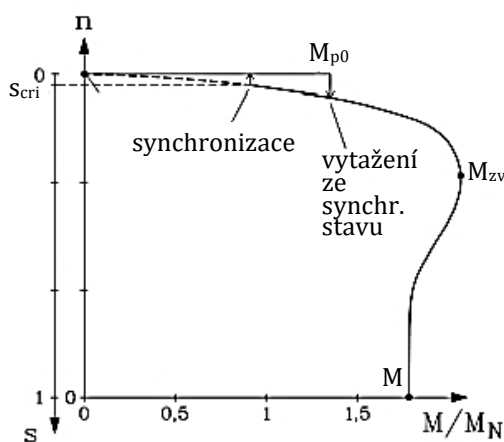
V [7] je z rovnice (2.11) odvozena rovnice pro výpočet kritické setrvačnosti:

$$s_{cri} = \frac{1}{\frac{\omega_{syn}}{p}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{po}}{\pi \cdot (J_{mot} + J_{zát}) \cdot f_{syn}}} \quad (2.12)$$

Tedy podmínka pro úspěšnou synchronizaci stroje je:

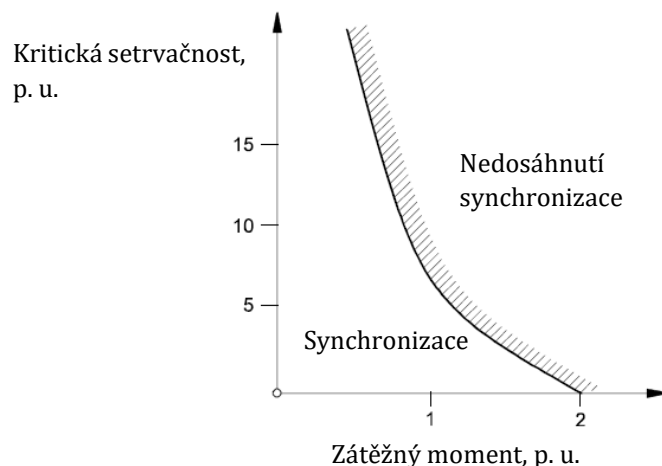
$$s_{cri} > s \quad (2.13)$$

Na obr. 2.6 je naznačena momentová charakteristika, kde je vyznačena oblast, kdy dochází k synchronizaci, tedy musí být splněna podmínka (2.13). Jak lze vidět po skoku do synchronního stavu motor pracuje na synchronních otáčkách n_{syn} . Pokud ovšem dojde k překročení maximálního momentu M_{p0} , dojde k „vytažení“ stroje ze synchronismu. Motor může poté znovu skočit do synchronního stavu, pokud bude mít skluz opět nižší než kritický skluz.



Obr. 2.6 Momentová charakteristika s vyznačeným kritickým skluzem a maximálním momentem [7]

Jestli motor dosáhne synchronismu, také závisí na zátěžném momentu a momentu setrvačnosti roztáčené hmoty. Tato závislost je vyznačená na obr. 2.7. Je zřejmé, že vyšší moment setrvačnosti vyžaduje menší zátěžný moment. Pro skok do synchronního chodu je zásadní, aby nebyla překročena kritická setrvačnost, která představuje nejvyšší možnou hodnotu momentu setrvačnosti při konkrétním zátěžném momentu [14].



Obr. 2.7 Schopnost dosáhnout synchronizace [14]

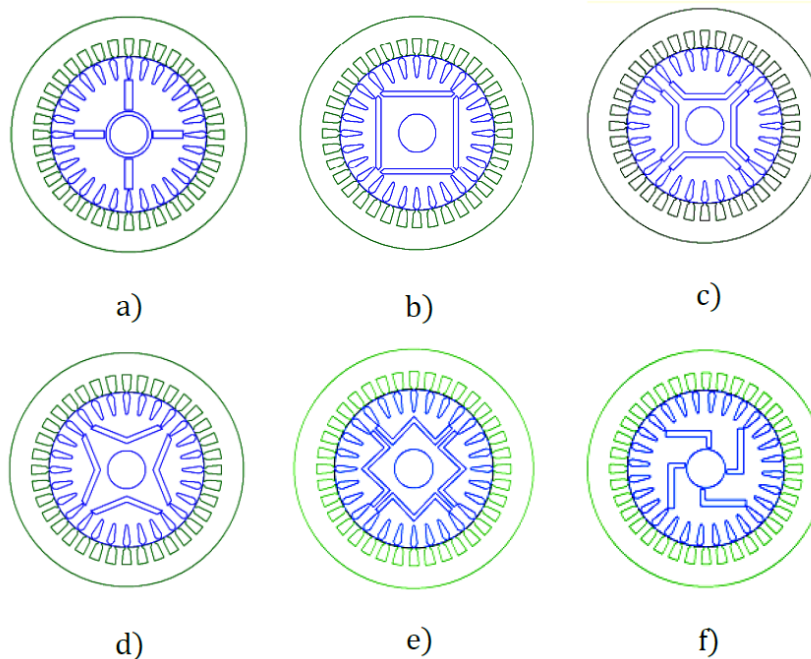
2.4 Současný stav řešení problematiky

2.4.1 Přehled provedení

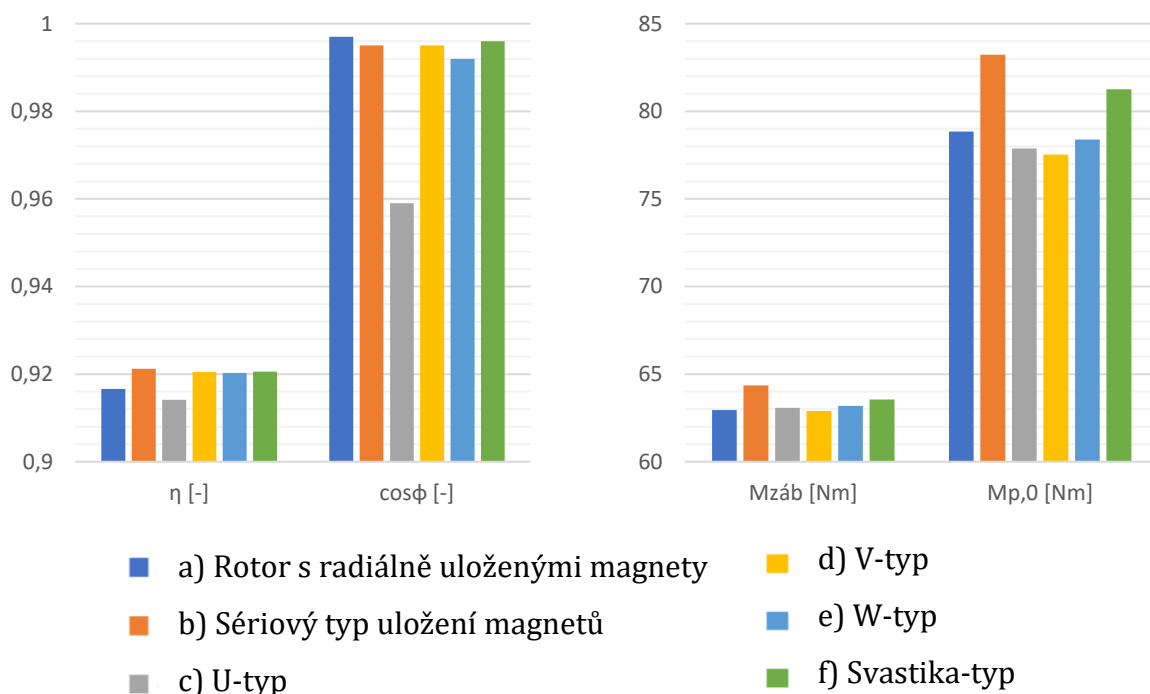
Během vývoje LSPMSM bylo navrženo velké množství různých kombinací klecí, tvaru magnetů a jejich umístění. Konfigurace rotoru má velký vliv na vlastnosti motoru. Těmto rozdílům se věnují v [1] [15] [16] [17]. Vybrané konfigurace permanentních magnetů uvnitř rotoru lze vidět na obrázku 2.8.

Všechny uvedené typy mají velmi dobré vlastnosti, např.: účinník, účinnost, maximální a záběrný moment, indukované napětí naprázdno a magnetickou indukci ve vzduchové mezeře. Nicméně jednotlivé typy se v těchto vlastnostech od sebe odlišují, jak lze vidět v grafech v obrázku 2.9. Hodnoty v obr. 2.9 jsou výsledkem simulace v programu Maxwell pro LSPMSM motor o výkonu 3,7 kW [16].

Nejjednodušší konstrukci mají rotory s radiálně a sériově uloženými magnety, které představují dvě základní konfigurace magnetů v rotoru, další typy jako U, V a W jsou jejich variace. Rotor s radiálně uloženými magnety má v porovnání s rotorem se sériově uloženými magnety nižší účinnost, ale má silnější magnetické pole ve vzduchové mezeře, a tudíž i větší indukované napětí naprázdno. Silnější magnetické pole ve vzduchové mezeře je způsobeno díky tomu, že magnetický tok je sem dodáváný od dvou sousedních magnetů, ne pouze od jednoho magnetu, jak je tomu u rotoru se sériově uloženými magnety. Jelikož z rovnice (2.5) víme, že brzdný moment je závislý na U_0 s druhou mocninou, je jasné, že záběrný i maximální moment bude nižší než u rotoru se sériově uloženými magnety. Ovšem při radiálním uložení magnetů ke zde větší rozptyl magnetického toku směrem do středu rotoru, které jdou ale omezit nemagnetickou hřídelí nebo různými bariérami. Podrobněji se těmito dvěma typům rotoru věnuje článek [16].



Obr. 2.8 Konfigurace rotorů s vnořenými magnety pro LSPMSM: (a) Rotor s radiálně uloženými magnety, (b) Sériový typ uložení magnetů, (c) U-tyt uložení magnetů, (d) V-tyt uložení magnetů, (e) W-tyt uložení magnetů, (f) Svastika-tyt uložení magnetů, [1]



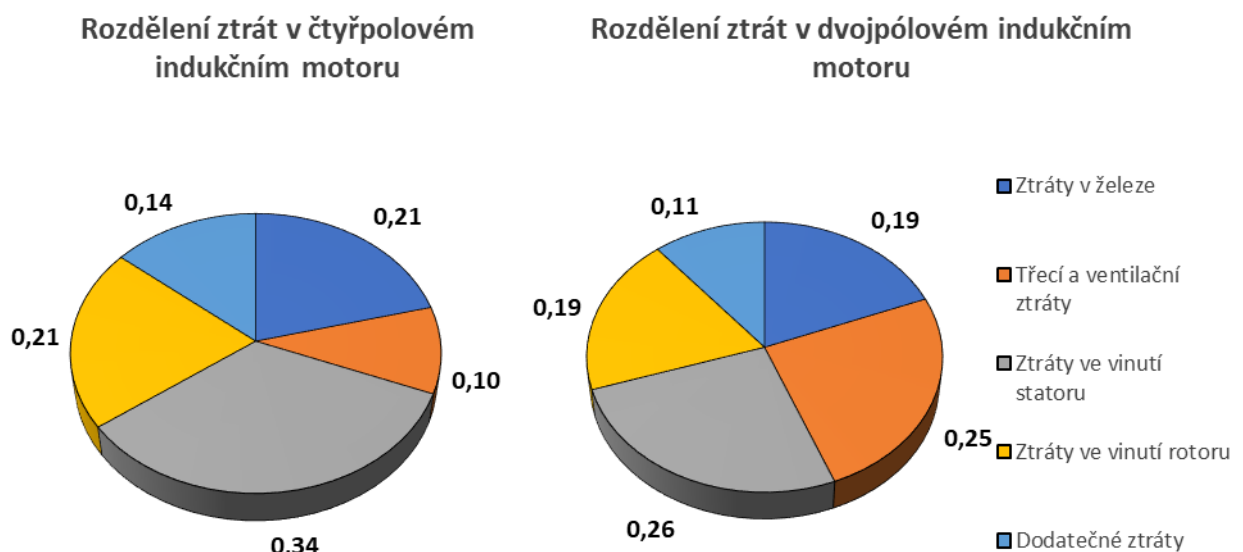
Obr. 2.9 Porovnání vlastností jednotlivých typů rotorů z obr. 2.8 [16]

2.4.2 Vlastnosti současných strojů v porovnání s indukčním motorem

V následujících podkapitolách jsou rozebrány různé vlastnosti LSPMSM v porovnání s indukčním motorem. Tyto informace vycházejí z [1] [3].

2.4.2.1 Účinnost

Rozdělení ztrát u indukčního motoru lze vidět na obrázku 2.10, který ukazuje, že 20 % ztrát vzniká ve vinutí rotoru. U LSPMSM se tyto ztráty výrazně sníží. Největší ztráty jsou ve satorovém vinutí. Díky redukci magnetizačního proudu se zmenší efektivní hodnota proudu odebíraného satoru a tím pádem se také sníží satorové ztráty.



Obr. 2.10 Rozdělení ztrát v indukčním motoru [3]

V následující tabulce 2.1 je srovnání účinností a účínků LSPMSM a indukčního motoru. LSPMSM má vyšší účinnost a lepší účíněk než indukční motor nehledě na velikost stroje.

Tab. 2.1 Porovnání indukčních a LSPMS motorů [3]

Jmenovitý výkon motoru [W]	Indukční motor		LSPMS motor	
	Účinnost	Účíněk	Účinnost	Účíněk
596,6	0,733	0,688	0,862	0,986
1 491,4	0,809	0,770	0,892	0,895
3 728,5	0,868	0,854	0,904	0,879
18 643,0	0,936	0,880	0,957	0,920

2.4.2.2 Účíník

Indukční motor, jak již plyne z názvu, má silný indukční charakter, způsobující nízký účíník. Nízký účíník vede k větší zátěži na vedení, což vede k větším ztrátám, jeho zahřívání a poklesu napětí. LSPMSM má vyšší účíník, jak lze ostatně vidět v tabulce 2.1.

2.4.2.3 Váha

Další výhodou LSPMSM je, že má vyšší hustotu výkonu než indukční motor. Stroj díky tomu může být i při velkých jmenovitých výkonech relativně malý.

2.4.2.4 Teplota rotoru

Teplota rotoru závisí na ztrátách a na otáčkách motoru. U LSPMSM je sledování teploty velmi důležité z hlediska magnetů, aby nedošlo k trvalé demagnetizaci PM vlivem vysoké teploty (nesmí být přesáhnuta Curieova teplota). Ovšem velký podíl na zahřívání u indukčních motorů mají Jouleovy ztráty v kleci rotoru a ty u synchronního chodu výrazně zanikají, proto se rotor LSPMSM nezahřeje na tak vysokou teplotu jako indukční motor.

2.4.2.5 Rozběh a skok do synchronizmu

U indukčního motoru nejsou problémy s rozběhem stroje a jeho synchronizováním, jak vysvětluje kapitola 2.3.

2.4.2.6 Cena

Pořizovací cena motorů se skládá z nákladů na materiály a z nákladů na jeho výrobu. Přestože cena PM výrazně klesla oproti dřívějším dobám, jsou pořizovací náklady na materiál stále u LSPMSM vyšší. Ovšem srovnáme-li náklady na dlouhodobý provoz, tak LSPMSM vychází finančně lépe než indukční motory, díky jejich vyšší účinnosti. Už zvýšení účinnosti o jedno procento výrazně navýší roční úspory. Tyto úspory se zvětšují s roční provozní dobou, jmenovitým výkonem a zátěží stroje a cenou elektrické energie. Díky těmto skutečnostem mohou být v určitých případech celkové náklady (investiční a provozní) u LSPMSM nižší než u indukčních motorů.

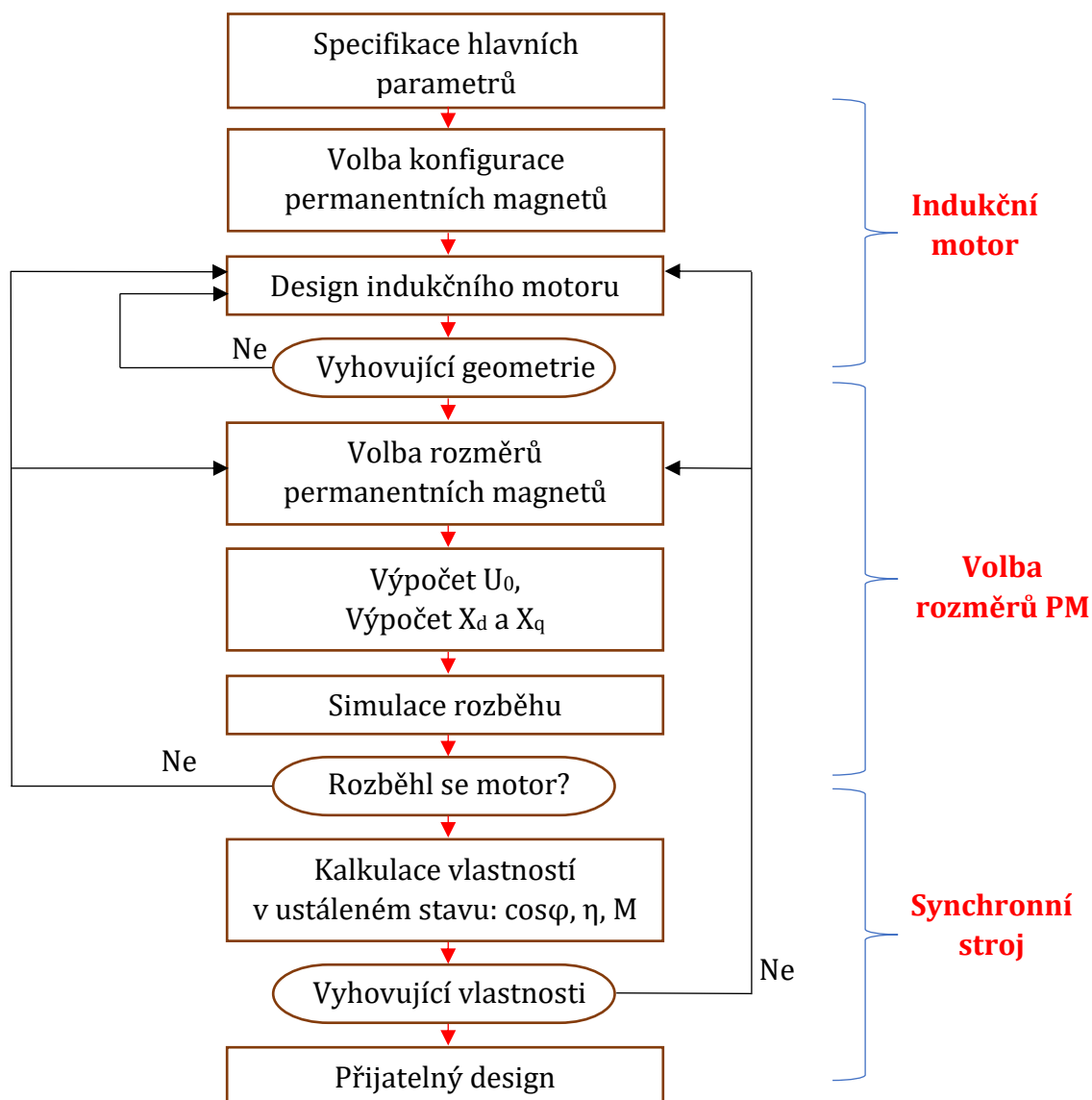
2.4.2.7 Výroba a výběr motoru podle požadovaného výkonu

Stator je u obou motorů velmi podobný. U LSPMSM je náročnější výroba rotoru, kvůli přítomnosti PM, jejich uložení a upevnění přináší hodně problémů. Indukčních motory mají větší škálu v rozmezí jmenovitého výkonu, proto si vždy zákazník může vybrat přímo velikost motoru, kterou potřebuje. LSPMSM nejsou zatím vyráběny v takovém množství, proto musíme občas zvolit naddimenzovaný stroj, což může být neekonomické.

2.5 Analytický návrh stroje

2.5.1 Metodologie návrhu LSPMSM

Při návrhu LSPMSM máme na výběr ze dvou možností. První z nich, která je více užívanější, je úprava již navrhnutého asynchronního stroje. V tomto případě je využito toho, že stator může zůstat stejný jako u asynchronního stroje a změníme pouze rotor. Do rotoru jsou vloženy magnety nebo jsou usazeny přímo na jeho povrch. Výhodou této metody je, že můžeme využít již dobře navrhnutý asynchronní stroj. Druhá možnost je kompletní návrh stroje, kdy navrhujeme úplně nový stroj včetně statoru. Poněvadž LSPMSM je velmi podobný indukčnímu stroji je jeho návrh velmi podobný návrhu indukčního stroje. V obr. 2.11 je zobrazený postup návrhu LSPMSM a v následující kapitole 2.5.2 bude stručně vysvětlen elektromagnetický návrh indukčního stroje (včetně statoru), který vychází z [1], [9] a [12].



Obr. 2.11 Algoritmus návrhu LSPMSM [1]

2.5.2 Elektromagnetický návrh indukčního stroje

Prvním krokem je specifikace hlavních parametrů, tedy jmenovitých hodnot stroje. Na základě těchto hodnot jsme schopni vykonat jednotlivé kroky návrhu stroje. Mezi nejdůležitější hodnoty patří ty, které jsou uvedeny na štítku stroje:

- Typ stroje: motor/generátor
- Konstrukční řada
- Výkon stroje
- Jmenovité otáčky
- Počet pólů stroje
- Jmenovitá frekvence
- Jmenovité napětí
- Jmenovitý proud
- Počet fází
- Účinník
- Účinnost
- Zatížení stroje
- Další parametry: krytí, moment/proud naprázdno/nakrátko, záběrný moment/proud, pracovní prostředí apod.

Z hlavních parametrů se vypočítají hlavní rozměry stroje jako je vnější průměr a délka rotoru. Pomocí empirických vztahů se zvolí délka vzduchové mezeře, díky které je také vypočten vnitřní průměr statoru a pólová rozteč. Poté je volen typ vynutí, počet drážek rotoru a statoru a jejich drážkové rozteče. Počet drážek rotoru a statoru se volí podle známých nejvýhodnějších kombinací. Dle tabulek se také dále volí magnetická indukce v různých částech stroje jako je stator, rotor a vzduchová mezera. Ve statoru a rotoru se volí magnetická indukce pro nejužší místo zubu, prostředek zubu a jeho.

Počet závitů na jednu fázi je vypočten z indukovaného napětí, zvolené magnetické indukce ve vzduchové mezeře, pólové rozteče, uhlové rychlosti a saturačního faktoru, který představuje poměr průměrné a špičkové hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře a je závislý na sycení v železe. Počáteční hodnota saturačního faktoru je volena $2/\pi$ za předpokladu, že průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře je blízký sinusovému. Z počtu závitů na jednu fázi se určí počet vodičů v jedné drážce. Počet vodičů v jedné drážce většinou vychází ve zlomkovém tvaru. V reálném vinutí ovšem toto číslo musí být přirozené, proto vybíráme nejbližší možnou hodnotu. Pro dvojvrstvé vinutí musí být splněna podmínka, že toto přirozené číslo bude sudé. Po zvolení počtu závitů na drážku se znovu určí počet závitů na fázi a s tímto novým počtem závitů na fázi je stanovena nová hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře, který dále slouží k zvolení jednotlivých rozměrů statorových a rotorových zubů.

Nyní nastává „kontrolní“ bod, kdy se počítá magnetické napětí v zubu statoru a rotoru a ve vzduchové mezeře, z těchto hodnot je určena nová hodnota saturačního faktoru. Pokud je tato hodnota odlišná od původní zvolené hodnoty, vrátíme se ke kroku, kdy byla zvolena původní hodnota a proces opakujeme do té doby, dokud si nebudou tyto dvě hodnoty rovny. Jakmile si budou rovny, pokračujeme k výpočtu výšky statorového a rotorového jha a dále vnitřního průměru rotoru a vnějšího průměru statoru.

V této chvíli jsou již stanoveny všechny hlavní parametry stroje. Jako poslední je nutné vypočítat potřebnou výšku magnetu, což lze provést na základě zvoleného pracovního bodu na demagnetizační charakteristice PM, který je již v podstatě stanoven zvolenou magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře. Magnetické napětí permanentního magnetu musí pokrýt „úbytky“ magnetického napětí na vzduchové mezeře, feromagnetických částech a v případě nelineární B-H charakteristiky feromagnetických materiálů také demagnetizační účinek příčné reakce kotvy při zatížení. Při použití lineárních materiálů lze napětí reakce kotvy zanedbat. Je však nutné po návrhu výšky magnetu provést kontrolní výpočet, aby nedošlo k nevratné demagnetizaci reakčním magnetickým polem při maximálním proudu. Při rozběhu nebo přetížení může ve vzduchové mezeře, a tedy i v části permanentního magnetu na povrchu, dojít tak k silnému poklesu magnetické indukce, že nastane nevratná demagnetizace této části permanentního magnetu. U rotoru s vnořenými PM jsou permanentní magnety lépe chráněny před nevratnou demagnetizací než rotory s PM na povrchu.

Jak již bylo napsáno v úvodu této práce, budeme navrhovat synchronní motor spouštěný ze sítě s využitím již navrženého asynchronního stroje. Tento asynchronní stroj je podrobněji analyzován v kapitole 3. Po této analýze bude rotor z asynchronního stroje upraven na rotor synchronního stroje spouštěného ze sítě. Změny rotoru jsou popsány v kapitole 4.

3 MODEL ZADANÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE

V této práci se při návrhu synchronního stroje spouštěného ze sítě vychází z asynchronního motoru. V této kapitole bude namodelován a analyzován výchozí asynchronní stroj v programu RMxpert.

3.1 Klíčové parametry zadaného stroje

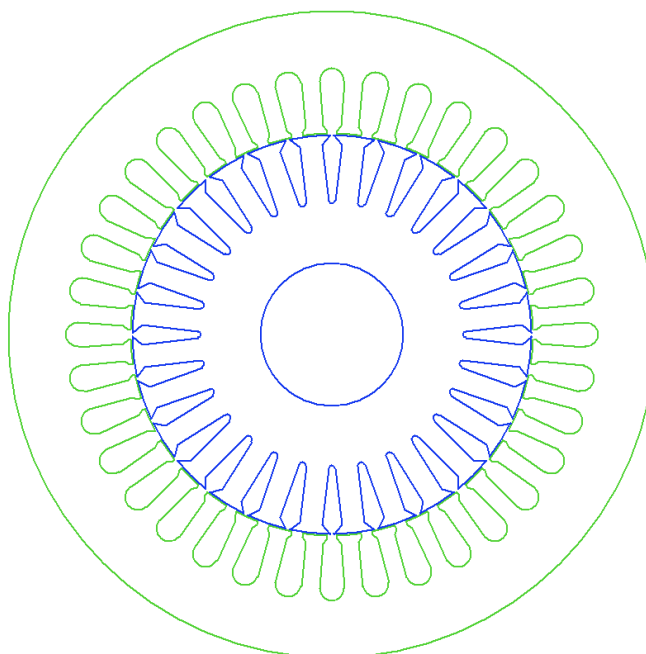
Pro návrh synchronního motoru spouštěného ze sítě bude použit jako výchozí stroj asynchronní motor. Jedná se o běžný čtyřpólový asynchronní motor s klecí nakrátko. Napájecí napětí statoru je 400 V a zapojení je do Y. Vinutí statoru je jednovrstvé s elektrickým krokem 9 a natočení drážky rotoru je o jednu drážkovou rozteč statoru. Motor je v účinnosti třídě IE3 – velká účinnost.

Tabulka 3.1 Parametry asynchronního motoru

Výkon	Moment	Napětí	Frekvence	Skluž	Otáčky	Počet pólů
P [W]	M_N [Nm]	U_s [V]	f [Hz]	s [%]	n [ot/min]	2p [-]
1500	9,905	400	50	3,588	1446,2	4

3.2 Výpočet zadaného stroje v RMxpert

Podle výkresové dokumentace jsou všechny rozměry zadány do programu RMxpert, který následně vypočítá všechny parametry motoru. Na obr. 3.1 je řez modelu motoru v RMxpert. Výpočetem v RMxpert byly zjištěny základní parametry stroje. Ty jsou pro přehlednost uvedeny v Tabulce 3.2.



Obr. 3.1 Model výchozího asynchronního motoru v RMxpert

Tabulka 3.2 Vypočtené hodnoty v RMxpřt

Parametr	Jednotka	Hodnota
Jmenovité otáčky	ot/min	1 462,29
Jmenovitá frekvence	Hz	50
Jmenovité sdružené napětí, zapojení do hvězdy	V	400
Jmenovité fázové napětí, zapojení do hvězdy	V	230
Jmenovitý elektrický výkon	kW	1,517
Jmenovitý moment	Nm	9,904
Jmenovitý fázový proud	A	3,237
Skluz při jmenovitém bodu	%	2,51
Účinník při jmenovitém bodu	-	0,78
Účinnost pro jmenovitý bod	%	86,353
Odpor vinutí statoru při 20 °C	Ω	2,881
Mag. indukce ve vzduch. mezeře při stavu naprázdno	T	0,706
Magnetická indukce ve jhu statoru při stavu naprázdno	T	1,241
Magnetická indukce v zubu statoru při stavu naprázdno	T	1,461
Magnetická indukce v zubu rotoru při stavu naprázdno	T	1,495
Magnetická indukce ve jhu rotoru při stavu naprázdno	T	0,577

Po analýze máme k dispozici také rozdělení ztrát ve stroji. Toto rozdělení ztrát je uvedeno v tabulce 3.3.

Tab. 3.3 Rozdělení ztrát v AM vypočtených v RMxpřt a uvedených v technické dokumentaci

Typ ztrát	RMxpřt		Technická dokumentace	
	Hodnota [W]	Podíl ztrát [%]	Hodnota [W]	Podíl ztrát [%]
Ohmické ztráty ve vinutí statoru	123,441	51,50	139,8	48,68
Ohmické ztráty v kleci rotoru	39,610	16,53	57,2	19,92
Ztráty v železe	49,640	20,71	61,3	21,34
Dodatečné ztráty	7,500	3,13	8,9	3,10
Mechanické ztráty (ventilační)	19,497	8,13	20,0	6,96
Celkové ztráty	239,689	-	287,2	-

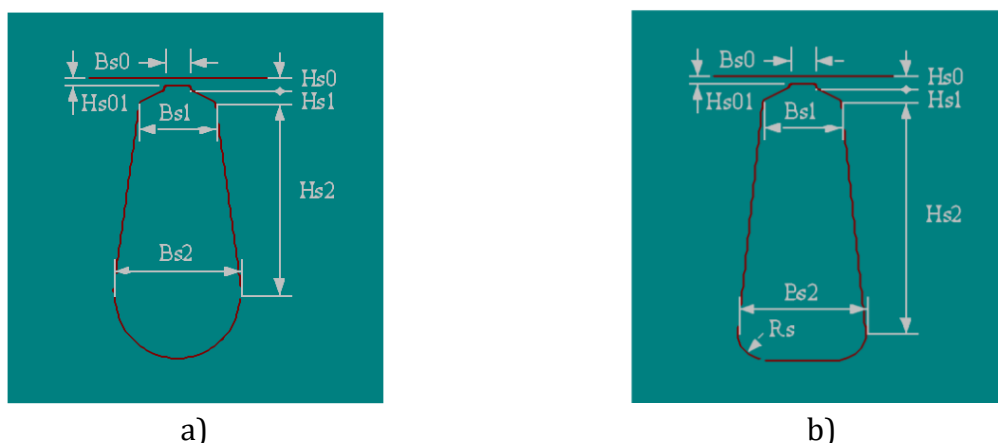
V tabulce 3.3 jde vidět, že rozdělení ztrát vypočtené v RMxpřt se liší oproti rozdělení ztrát uvedeném v technické dokumentaci asynchronního stroje. Tento rozdíl může být způsobený tím, že RMxpřt při výpočtu neuvažuje sycení železa, tudíž ztráty budou vycházet menší, než ve skutečnosti jsou. Největší podíl ztrát ve stroji mají ztráty vznikající ve vinutí statoru. Tyto ztráty tvoří polovinu všech ztrát ve stroji a dohromady se ztrátami ve vinutí rotoru tvoří skoro 70 % všech ztrát. Právě ohmické ztráty v kleci rotoru můžeme zmenšit, jestliže asynchronní motor změním na synchronní motor spouštěný ze sítě, neboť v LSPMSM nejsou v synchronním stavu ohmické ztráty v rotoru, protože klecí neteče žádný proud. Tudíž bychom mohli snížit ztráty o 16,53 %. Ztráty v železe tvoří 20,71 % a dodatečné a mechanické ztráty tvoří 11,26 %.

4 NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ

Navržený synchronní motor spouštěný ze sítě vychází z asynchronního motoru zkoumaného v předchozí kapitole. Stator zůstane stejný jako u AM, ovšem rotor bude změněn.

4.1 Úprava klece rotoru a volba velikosti magnetů

Hlavním rozdílem u rotoru LSPMSM oproti rotoru AM je přítomnost permanentních magnetů, v tomto případě uložených uvnitř rotoru. V kapitole 2.4.1 jsou popsány různé konfigurace magnetů. Z těchto konfigurací byl pro tento návrh LSPMSM vybrán rotor se sériově uloženými magnety, neboť dle grafů v obr. 2.9 má nejvyšší účinnost, velmi dobrý účinník. Dále se vyznačuje velkým záběrným momentem, který je nutný pro překonání brzděného momentu od PM a taktéž dosahuje velkého maximálního momentu. Pro permanentní magnety musí být v rotoru vytvořeno dostatečné místo, čehož dosáhneme úpravou klece. Musí se zmenšit rozměr H_{s2} v obr. 4.1 a). Je zřejmé, že touto úpravou se bude zmenšovat i celkový obsah rotorové drážky (tyče).



Obr. 4.1 Rozměry: a) původní rotorové drážky v RMxpřt, b) nové rotorové drážky v RMxpřt

Klec rotoru má vliv na podstatné parametry stroje jako záběrný moment, moment zvratu a skluz. Přidané magnety vytváří při rozběhu brzděný moment, který působí proti momentu rozběhové klece. Z tohoto důvodu se snažíme, aby byl záběrný moment od klece co největší.

Víme, že čím je větší plocha rotorové drážky, tím je menší její odpor a protéká jí tedy větší proud, který vytvoří větší záběrný moment. Abychom dosáhli zvětšení plochy rotorové drážky, změnili jsme její tvar. Nový tvar drážky je zakótován na obr. 4.1 b). Dno drážky je nyní rovné a zároveň jsme zvětšili rozměr B_{s1} . Po této úpravě bude drážka mít dostatečný průřez i po zmenšení rozměru H_{s2} . Zároveň při úpravě rozměru H_{s2} budeme udržovat šířku rotorového zubu stejnou, tedy budeme zároveň měnit rozměr B_{s2} .

$$B_{s2} = B_{s1} - \frac{2 \cdot \pi \cdot H_{s2}}{28} \quad (4.1)$$

Při změně průřezu drážky rotoru se bude měnit hodnota skluzu. Přestože se u synchronních strojů pojem skluz nepoužívá, neboť pracují na synchronních otáčkách,

my jej budeme používat pro popis rozběhových charakteristik. Skluz v tomto případě je definovaný stejně jako v rovnici (2.1), kde n_1 představují synchronní otáčky a n jmenovité otáčky, které by stroj měl, kdyby neobsahoval permanentní magnety. U LSPMSM je hodnota momentu setrvačnosti zátěže spojena se skluzem, při které ještě bude stroj schopný „skočit“ do synchronního stavu, viz kapitolu 2.3.2. Článek [5] udává, že hodnotu skluzu je vhodné volit do 5 %.

Jako zátěž motoru je uvažována zátěž v podobě ventilátoru, jejíž momentová charakteristika je v obr. 5.2 společně s ostatními momenty působícími ve stroji. Ventilátorová charakteristika platí pro odstředivá čerpadla, ventilátory, kompresory apod. Moment zátěže je závislý na otáčkách s druhou mocninou.

$$M = k \cdot \omega^2 = k \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}\right)^2 \quad (4.2)$$

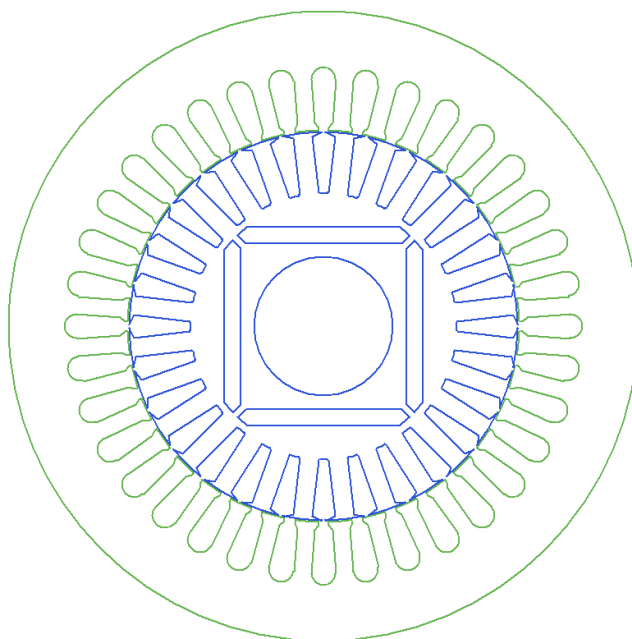
Kde k je konstanta stroje, která je vypočtena ze známého momentu při jmenovitých otáčkách, tj. 1500 otáček za minutu. Pro zátěž je uvažován moment setrvačnosti roven momentu setrvačnosti rotoru elektrického stroje. Hodnota momentu setrvačnosti rotoru stroje byla vypočtena v RMxpřt.

Výška klece byla volena tak, aby moment vytvářený proudem v kleci byl větší než u původního stroje, neboť přidané magnety při rozběhu stroje vytváří brzdny moment, který působí proti momentu od klece. Magnety tedy nemohou být moc velké a klec příliš malá, neboť by se stroj vůbec nerozběhl.

Velikost klece byla laděna společně s velikostí magnetu přes parametrické nástroje programu RMxpřt a to tak aby stroj při skluzu 5% byl schopen poháněnou zátěž vtáhnout do synchronismu. Tedy výsledný moment od klece a magnetů musí být větší než moment zátěže. Jelikož nám magnet vycházel velmi malý, byla jeho minimální výška zvolena 3,5 mm a jako parametr velikosti magnetu jsme použili šířku magnetu. Při výpočtu je uvažovaný magnet N35UH s teplotou 20 °C. Při této teplotě má magnet nejvyšší B_r a H_c – generuje nejvyšší brzdny moment. Při zahřívání magnetu bude menší B_r i H_c a proto bude generovat menší brzdny moment, proto při výpočtu s takto uvažovaným magnetem jsme tak na tzv. bezpečné straně. Velikost magnetu má vliv na maximální přetížení stroje, což má vliv na kritický skluz, jak lze vidět v rovnici (2.12). Kritický skluz udává skutečnou hodnotu skluzu, kdy je stroj schopný skočit do synchronismu. S velikostí magnetů roste maximální výstupní výkon, tedy i kritický skluz. Ovšem při rozběhu větší magnety budou vytvářet větší brzdny moment a na kritickém skluzu bude výsledný moment od magnetů a klece menší. Je zde riziko, že výsledný moment při kritickém skluzu nebude dostatečně velký, aby byl motor vtažen do synchronního stavu.

5 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ NAVRŽENÉHO STROJE V RMXPRT A MAXWELL

Na základě předešlých úvah byl vytvořen model synchronního motoru spouštěného ze sítě v programu RMxpert, jehož řez lze vidět na obrázku 5.1.



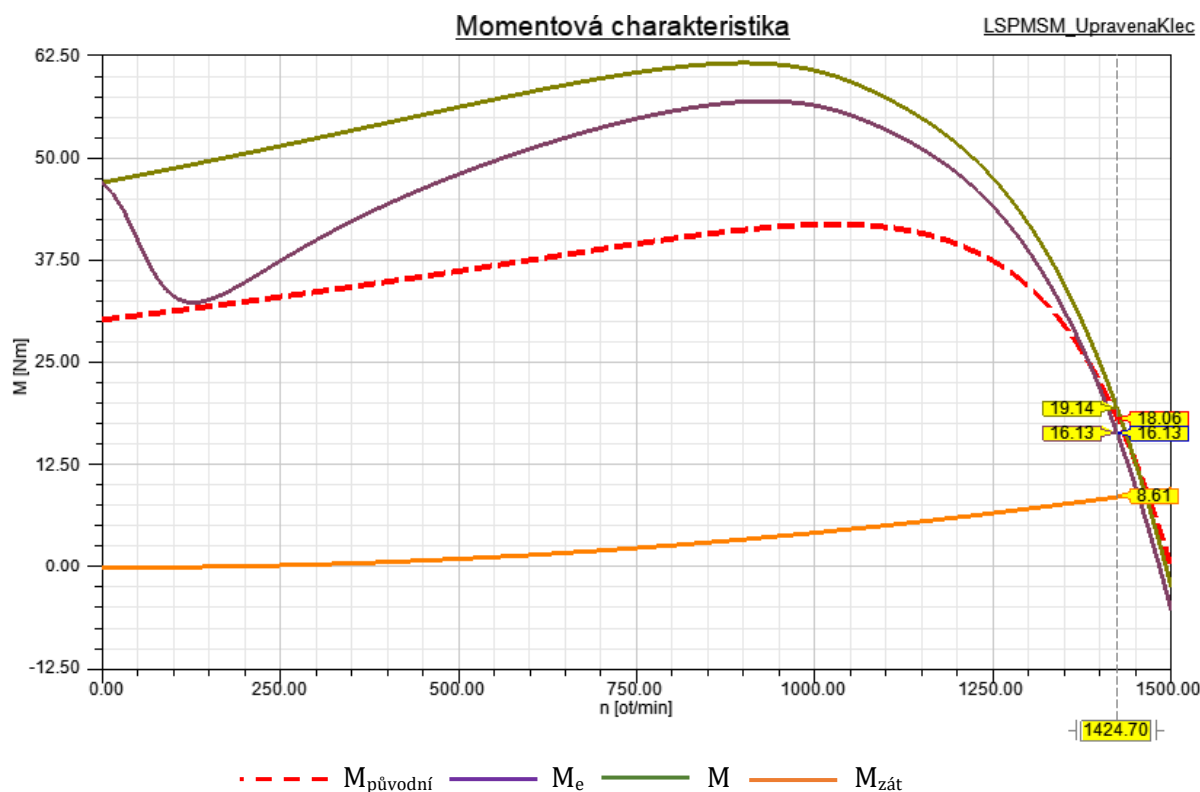
Obr. 5.1 Model synchronního motoru spouštěného ze sítě v RMxpert

Teplota stroje je uvažována 75 °C, tato teplota je volena na základě oteplení výchozího asynchronního stroje. Lze předpokládat, že u LSPMSM díky absenci ztrát v kleci rotoru bude tato teplota nižší. Uvažovaná teplota je tak na tzv. bezpečné straně. Díky nižší teplotě budou i lepší rozběhové vlastnosti stroje, díky vyšší vodivosti rotoru. Abychom ukázali pravé vlastnosti při rozběhu z klidu bude výpočet stroje a charakteristik daného stroje proveden na teplotě 40 °C což odpovídá obecně uvažované teplotě okolí pro průmyslové aplikace. Při výpočtu je tedy uvažovaný magnet N35UH s teplotou 40 °C. Vypočtené základní parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1

Po analýze máme k dispozici také rozdělení ztrát ve stroji, které jsou uvedeny v tab. 5.2. Největší ztráty jsou ve vinutí statoru, které tvoří 56,33 % veškerých ztrát ve stroji.

Na obr. 5.2 je vypočtená momentová charakteristika stroje při rozběhu z klidu v programu RMxpert. Lze vidět, že záběrný moment od klece je vyšší než u původního stroje. Výsledný moment je složen ze záběrného momentu od klece a brzdného momentu od permanentních magnetů. Přičemž při nízkých otáčkách dochází k výraznému poklesu momentu způsobeného brzdícím momentem od PM. Pokud bychom se výsledným momentem dostali pod křivku původního momentu stroje, mohly by nastat problémy při rozběhu stroje. Ale protože na motor je připojena zátěž s ventilátorovou charakteristikou, která má při nízkých otáčkách velmi malý zátěžný moment, pravděpodobně by se motor rozběhl i kdyby se propad výsledného momentu dostal pod původní moment. Přesto jsme volili PM a velikost klece takovým způsobem, aby byly zachovány rozběhové vlastnosti

výchozího asynchronního stroje. Kritický skluz byl u navrženého stroje vypočten 5,02 % a na tomto skluzu je zátěžný moment roven 8,61 Nm. Výsledný moment od stroje na těchto otáčkách je 16,13 Nm, máme tedy dostatečnou momentovou rezervu a stroj bude schopen skočit do synchronního stavu.



Obr. 5.2 Momentová charakteristika LSPMSM

Tab. 5.1 Vypočtené hodnoty v RMxpřt

Parametr	Jednotka	Hodnota
Jmenovité otáčky	ot/min	1500
Jmenovitá frekvence	Hz	50
Jmenovité sdružené napětí, zapojení do hvězdy	V	400
Jmenovité fázové napětí, zapojení do hvězdy	V	230
Jmenovitý elektrický výkon	kW	1,4995
Jmenovitý moment	Nm	9,546
Skluz při jmenovitém bodu	%	0
Účinník $\cos\phi$, při jmenovitém bodu	-	0,9797
Účinnost pro jmenovitý bod	%	94,5416
Mag. indukce ve vzduch. mezeře při stavu naprázdno (základní harmonická)	T	0,395
Magnetická indukce ve jhu statoru při stavu naprázdno	T	0,927
Magnetická indukce v zubu statoru při stavu naprázdno	T	0,820
Magnetická indukce v zubu rotoru při stavu naprázdno	T	1,067
Magnetická indukce ve jhu rotoru při stavu naprázdno	T	0,950

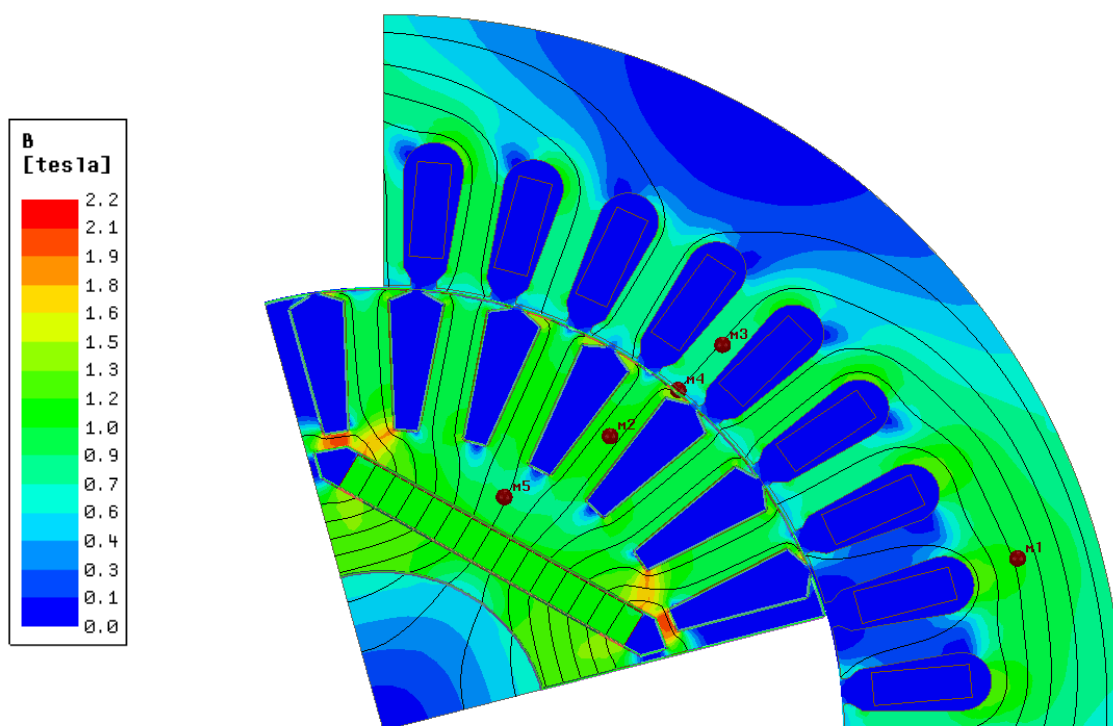
Tab. 5.2 Rozdělení ztrát v LSPMSM vypočtených v RMxpert

Typ ztrát	Hodnota [W]	Podíl ztrát [%]
Ohmické ztráty	48,768	56,33
Ztráty v železe	17,808	20,57
Mechanické ztráty (ventilační)	20,000	23,10
Celkové ztráty	86,576	-

V následujících kapitolách bude stroj analyzován při stavu naprázdno, rozběh stroje a stav při zatížení.

5.1 Stav naprázdno

Stav naprázdno u motoru znamená, že neodebíráme žádný mechanický výkon, kromě výkonu potřebného na pokrytí mechanických ztrát. Indukované napětí U_0 předbíhá magnetický tok o 90° . Rozložení magnetického toku ve stroji je vypočteno pomocí programu ANSYS Maxwell a je zobrazeno na obrázku 5.3.



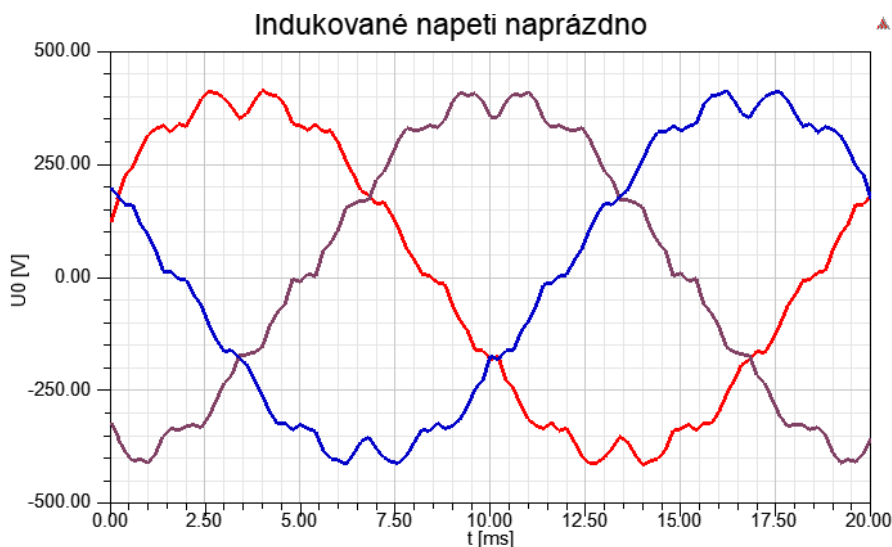
Obr. 5.3 Rozložení magnetické indukce s vyznačenými siločárami v řezu stroje pro stav naprázdno

V následující tabulce 5.3 je přehled hodnot magnetické indukce v jednotlivých částech stroje. Nejvyšší magnetická indukce je mezi rotorovou drážkou a otvorem pro uložení permanentního magnetu. V této části dochází k přesycování materiálu, což má kladný účinek, neboť magnetický tok tak musí uzavřít svoji cestu přes stator.

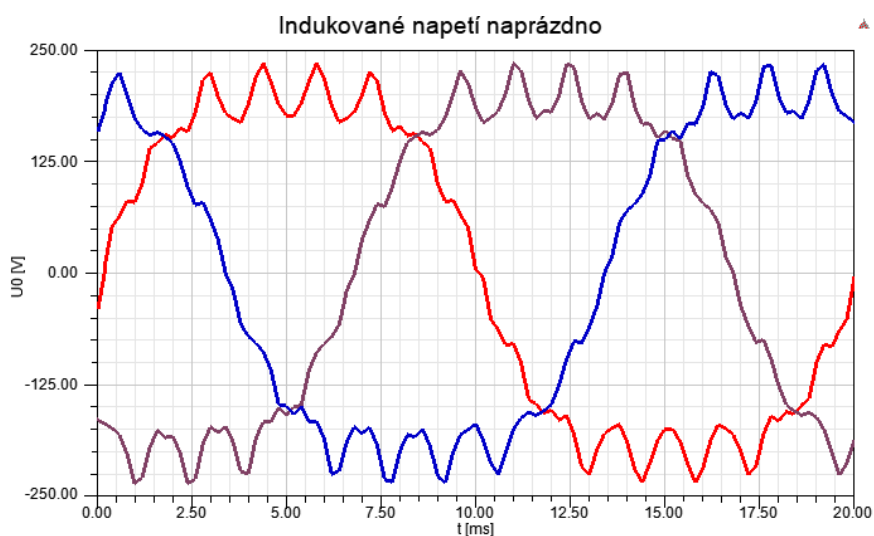
Tab. 5.3 Hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech stroje (viz obr. 5.3)

Parametr	Bod	Jednotka	Hodnota
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	M4	T	0,56
Magnetická indukce ve jhu statoru	M1	T	1,04
Magnetická indukce v zubu statoru	M3	T	0,84
Magnetická indukce v zubu rotoru	M2	T	1,03
Magnetická indukce ve jhu rotoru	M5	T	0,87

Průběh indukovaného napětí naprázdno U_0 je pro jednu periodu zobrazen na obrázku 5.4. Sdružené indukované napětí dosahuje hodnoty 281,5 V a fázové indukované napětí má efektivní hodnotu 165,2 V, což je přibližně 70 % fázového napětí. Na obr. 5.4 je zobrazen průběh sdruženého indukovaného napětí a na obrázku 5.5 průběh fázového indukovaného napětí. Napětí se velmi podobá sinusovému průběhu, ovšem je zde výrazné zvlnění. Z tohoto důvodu je provedena Fourierova analýza, za účelem zjistit, které vyšší harmonické složky indukované napětí naprázdno obsahuje.

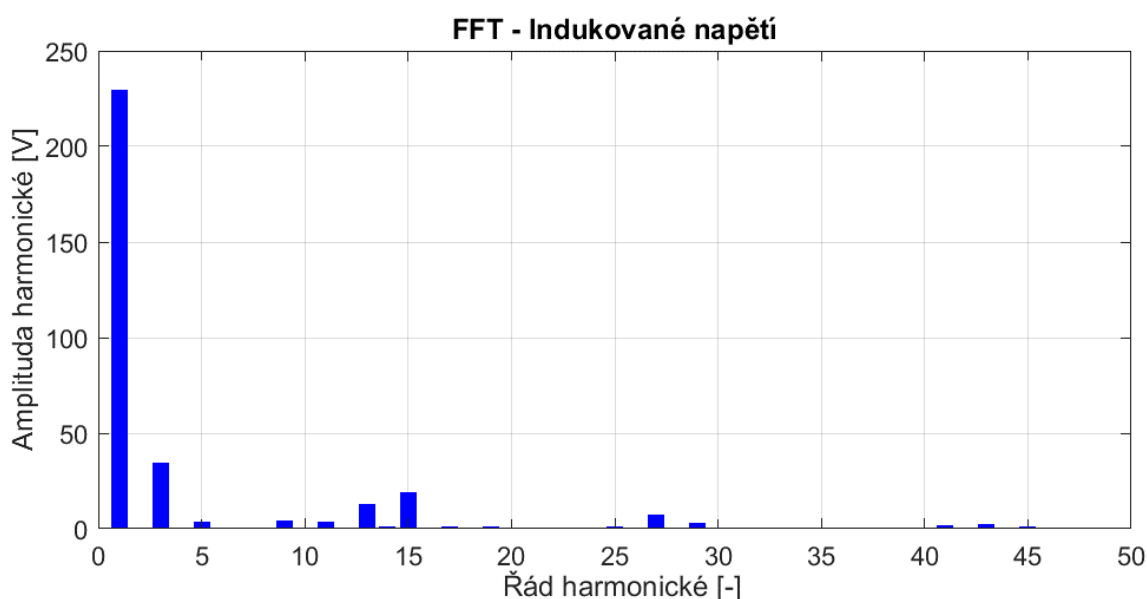


Obr. 5.4 Indukované sdružené napětí naprázdno na jednotlivých fázích



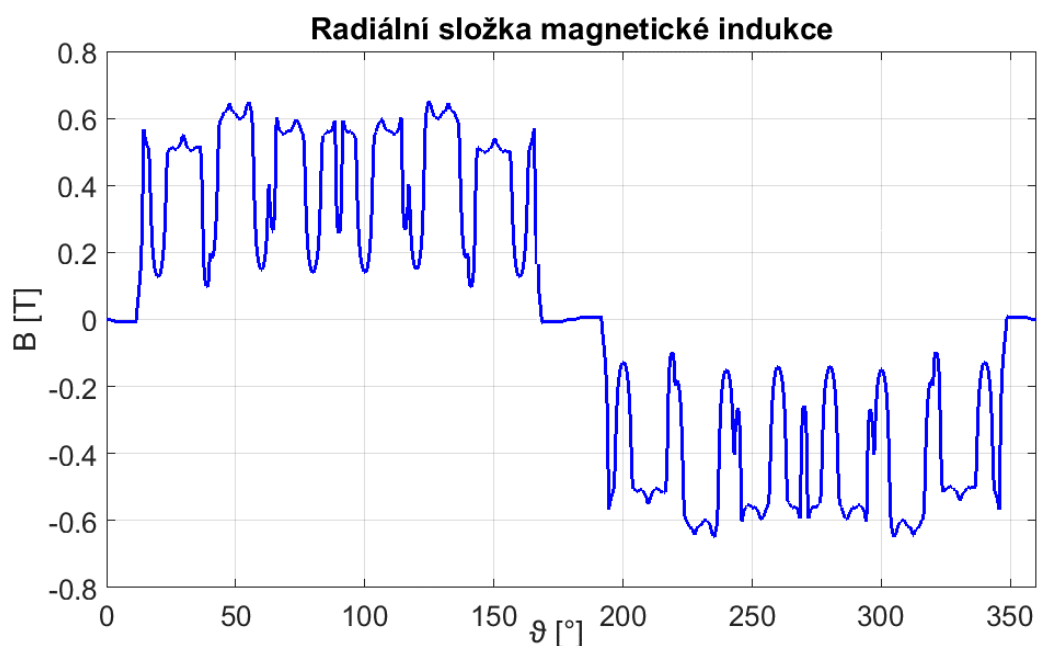
Obr. 5.5 Indukované fázové napětí naprázdno na jednotlivých fázích

Obrázek 5.6 ukazuje výsledky FFT (Rychlá Fourierova analýza) analýzy provedené v programu Matlab. Analýza je provedena pro indukované fázové napětí. Největší amplitudu má 1. harmonická, která koná užitečnou práci, na rozdíl od vyšších harmonických, které žádnou užitečnou práci nekonají. Je patrné, že signál obsahuje i vyšší harmonické. Tyto harmonické závisí na vinutí a geometrii rotoru a nasycují magnetický obvod stroje. Vyšší harmonické u indukovaného napětí dělíme na časové a prostorové, přičemž časové jsou způsobeny vyššími harmonickými proudy ve vinutí statoru a prostorové záleží na prostorovém uložení vinutí a jeho rozložení do drážek. Ovšem při stavu naprázdno neteče vinutím statoru žádný proud, tudíž se u indukovaného napětí naprázdno časové vyšší harmonické neprojeví. Nejvíce se zde projevuje 3. harmonická, protože magnetická indukce ve vzduchové mezeře má obdélníkový průběh, a poté menší měrou i další harmonické [11] [6].

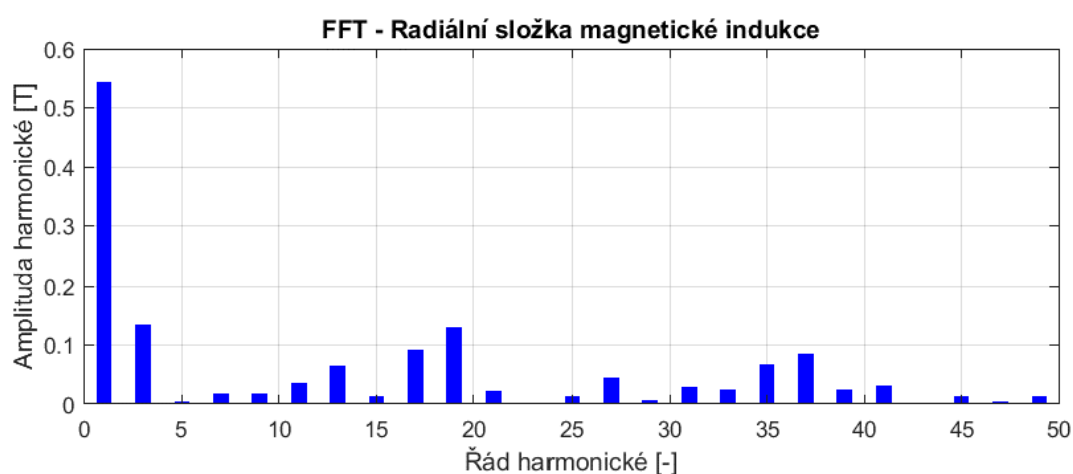


Obr. 5.6 FFT – analýza fázového indukovaného napětí naprázdno

Obrázek 5.7 ukazuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Průběh magnetické indukce je značně zvlněný a projevuje se zde spousta vyšších harmonických. Tyto harmonické jsou závislé na napětí a magnetické vodivosti vzduchové mezery. Na obr. 5.8 jsou výsledky provedené FFT pro magnetickou indukci. Na rozdíl od indukovaného napětí se zde mnohem více projevuje drážkování stroje. Jsou zde vyšší harmonické s poměrně velkou amplitudou kolem 18. a 36., které souvisí s počtem drážek statoru, kterých je 36. Rotorových drážek je ve stroji 28, proto také i v této oblasti se nachází 27. harmonická s vyšší amplitudou. Opět se zde nachází 3. harmonická, která má spojitost se syčením stroje.



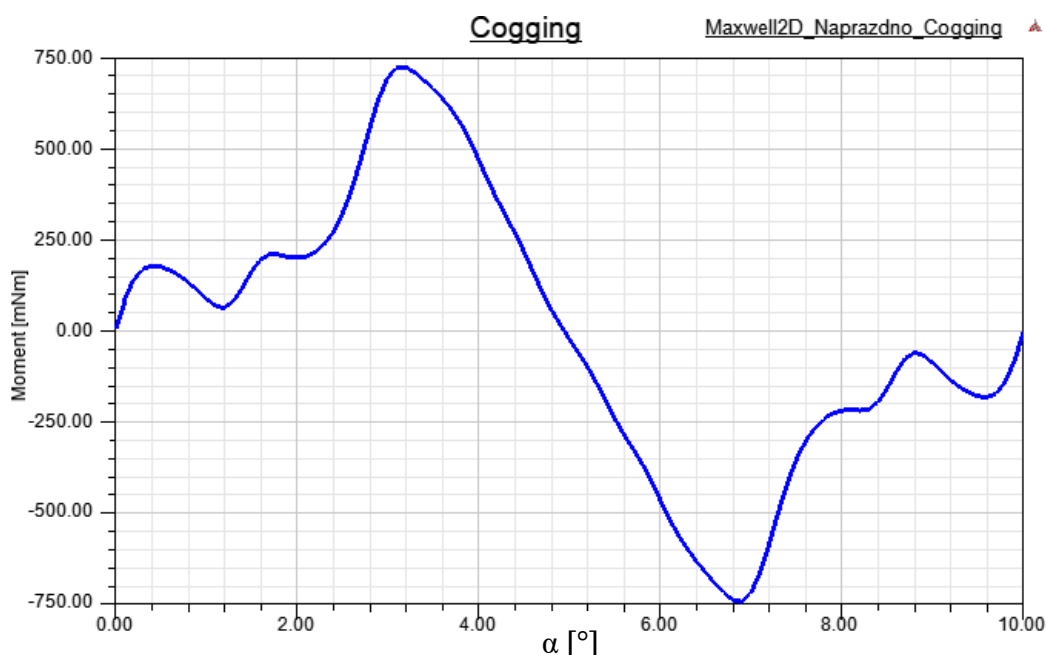
Obr. 5.7 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře



Obr. 5.8 FFT – analýza radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Vyšší harmonické napětí i magnetické indukce ve vzduchové mezeře lze utlumit různými metodami, především úpravami ve vinutí a změnou geometrie drážek. Například zkrácení kroku vinutí nebo vhodná volba počtu rotorových drážek vůči počtu drážek statoru.

Parazitní reluktanční moment (anglické označení: Cogging) u elektrických strojů je moment, který vzniká vzájemnou interakcí mezi permanentními magnety v rotoru a zuby statoru. Tento moment je závislý na úhlu natočení a periodicky se opakuje po určitém mechanickém úhlu, který závisí na počtu pólů a zubů. Parazitní reluktanční moment je téměř nezávislý na proudu statoru. Parazitní reluktanční moment je významný při nízkých otáčkách. Významný ve smyslu, že má velký poměr na výsledném momentu stroje, zatímco při vysokých otáčkách je „přemožen“ momentem setrvačnosti roztočeného motoru a zátěže [11].



Obr. 5.9 Parazitní reluktanční moment

Parazitní reluktanční moment může být zmenšován různými metodami, jako například zvětšení vzduchové mezery, zvětšení počtu drážek na pól, zešíkmení drážek rotoru nebo statoru, přičemž se většinou zešíknují drážky rotoru o jednu statorovou drážkovou rozteč a dalšími způsoby. Většina metod pro zmenšování parazitního reluktančního momentu vede také ke snížení elektromagnetické síly magnetů v motoru, tedy zmenšení výsledného momentu stroje v synchronním stavu. Amplituda parazitního reluktančního momentu je v RMxpřt vypočítána až 750 mNm a jeho průběh je zobrazen na obr. 5.9.

Parametry pro stav naprázdno byly taktéž vypočteny v programu Maxwell, které jsou uvedeny v tabulce 5.4 společně s hodnotami vypočtenými v RMxpřt. V kapitole 5.4 je porovnání těchto výsledků.

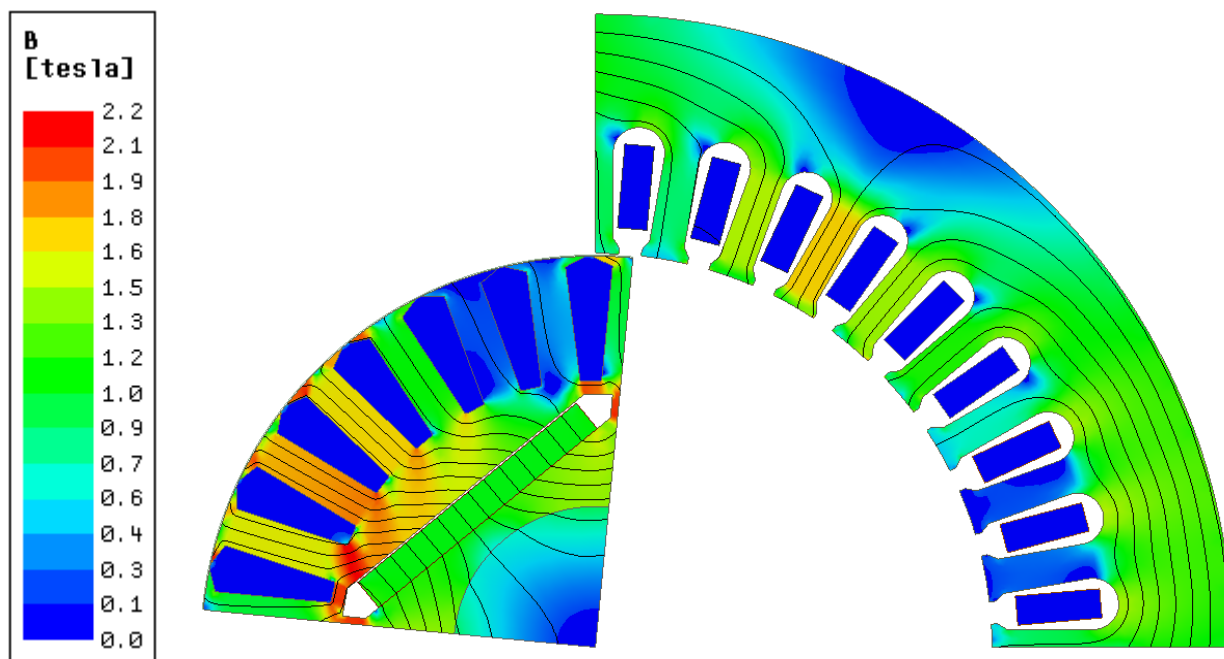
Tab. 5.4 Parametry vypočtené v programu Maxwell a RMxpřt

Parametry	Maxwell	RMxpřt
Mag. indukce ve vzduch. mezeře, první harmonická [T]	0,543	0,395
Ef. hodnota indukovaného napětí, první harmonická [V]	165,269	147,460
Napěťová konstanta [V/1000 ot.min ⁻¹]	190,836	170,272
Max. hodnota parazitního reluktančního momentu [mNm]	750,000	-

5.2 Stav při jmenovitém výstupním výkonu

Rozložení magnetického toku ve stroji je vypočteno pomocí programu ANSYS Maxwell a je zobrazeno na obrázku 5.10. Jak lze vidět, reakcí kotvy se vychyluje osa magnetického toku. Kvůli vychýlené ose magnetického toku zde dochází k přesycování stroje, akorát v tomto případě se toto přesycení nachází i v místech mezi permanentním magnetem a rotorovou tyčí, kterými musí procházet magnetický tok do statoru. Vlivem saturace materiálu v těchto místech dochází k poklesu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, tudíž i k poklesu výsledného elektromagnetického momentu. Kdybychom permanentní

magnet posunuly dále od klece směrem ke středu rotoru, nedocházelo by zde k přesycování materiálu. Ovšem toto řešení je nevhodné, neboť se snažíme, aby se PM nacházely co nejbližší ke statoru, kvůli zajištění dostatečného magnetického toku ve vzduchové mezeře. Navíc permanentní magnety nelze posunout blíže do středu rotoru kvůli místu, protože se zde již nachází hřídel motoru.



Obr. 5.10 Rozložení magnetické indukce s vyznačenými siločárami v řezu stroje pro stav při jmenovitém výkonu

Analýza stroje při jmenovitém výstupním výkonu vedla k výsledkům, které jsou uvedeny v tabulce 5.5. Účinnost stroje je 0,888, což je velmi dobrá účinnost a stroj se tedy ještě zařadí do třídy účinnosti IE4, což je velmi vysoká účinností třída, která má při výkonu 1,5 kW minimální účinnost 88,0 %. Účinník byl vypočten 0,804, který pro synchronní motory bývá obvykle vyšší, ale pro indukční motory je tato hodnota velmi dobrá.

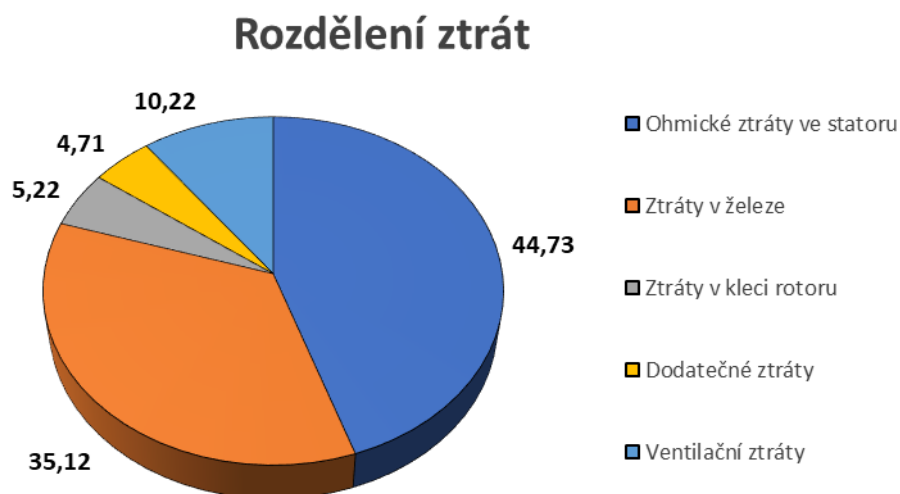
Tab. 5.5 Hodnoty při jmenovitém výstupním výkonu

Parametr	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý výstupní výkon	W	1543,707
Jmenovitý moment	Nm	9,828
Otáčky	ot/min	1500
Účinnost	-	0,888
Účinník	-	0,804
Jmenovitý proud	A	2,947
Indukované napětí naprázdno	V	214,767
Mag. indukce ve vzduch. mezeře, zákl. harmonická	T	0,724
Pulzační moment _{špička_špička}	mNm	5,396

V tabulce 5.6 je vidět rozložení ztrát a jejich procentuální zastoupení je pro názornost vyneseno na obrázku 5.11. Hodnota ztrát v železe byla násobena korekčním činitelem 1,5, který respektuje vliv výroby na vlastnosti plechu. Po vynásobení tímto činitelem se nacházíme na bezpečné straně výpočtu, tzn. ztráty naměřené na vyrobeném stroji by ve skutečnosti neměly překročit vypočtené hodnoty. Největší ztráty jsou ve vinutí statoru, následovány ztrátami v železe. Tentokrát na rozdíl od výpočtu v RMxprt, kde byly ztráty v rotoru předpokládány nulové, jsou zde přítomny Jouleovy ztráty v kleci rotoru. Tyto ztráty vznikají v důsledku vyšších harmonických magnetické indukce. V rotoru se bude indukovat takové napětí, aby proud jím protékající, vytvořil magnetické pole, které bude působit proti prostorovým harmonickým. Takto vzniklé ztráty jsou ovšem velmi malé v porovnání s ohmickými ztrátami v kleci rotoru u asynchronního motoru [10].

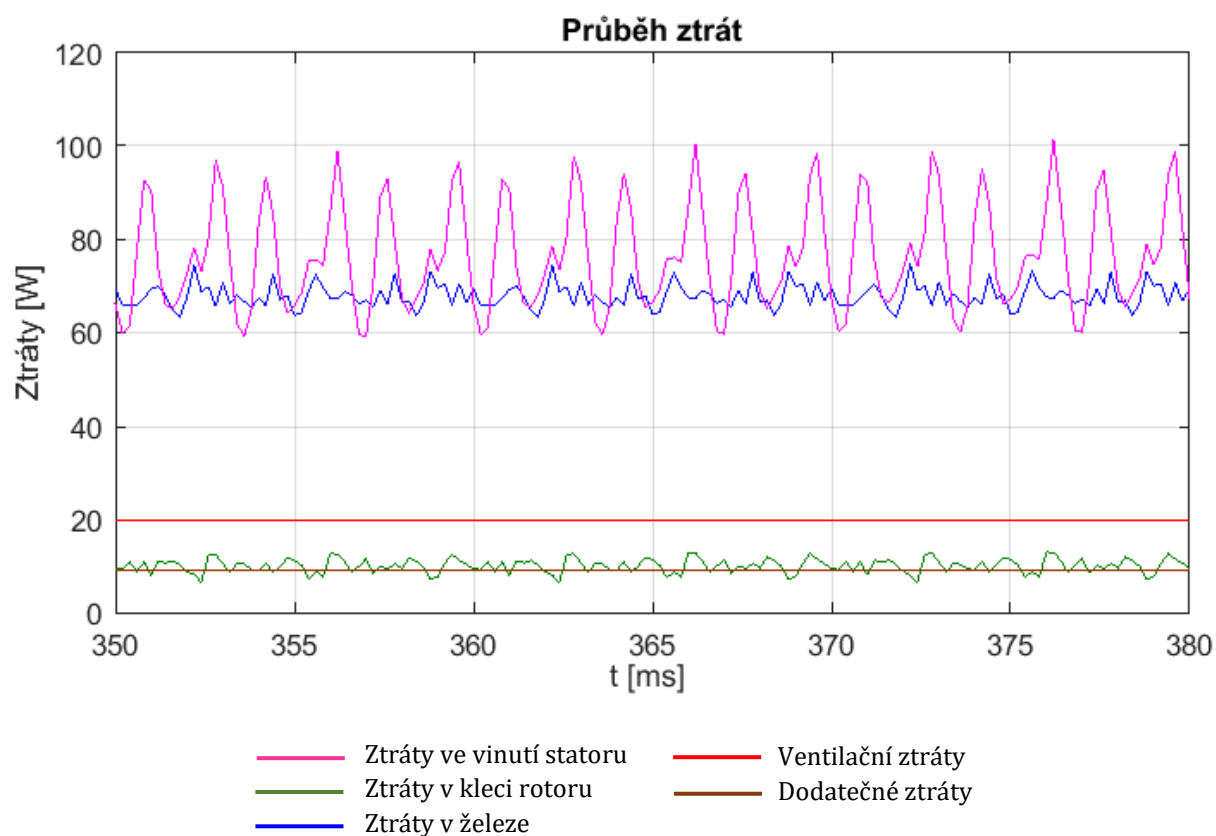
Tab. 5.6 Rozdělení ztrát v LSPMSM vypočtených v programu Maxwell

Typ ztrát	Hodnota [W]	Podíl ztrát [%]
Ohmické ztráty ve statoru	87,508	44,73
Ztráty v železe	68,708	35,12
Ztráty v kleci rotoru	10,214	5,22
Dodatečné ztráty	9,217	4,71
Mechanické ztráty (ventilační)	20,000	10,22
Celkové ztráty	195,647	-

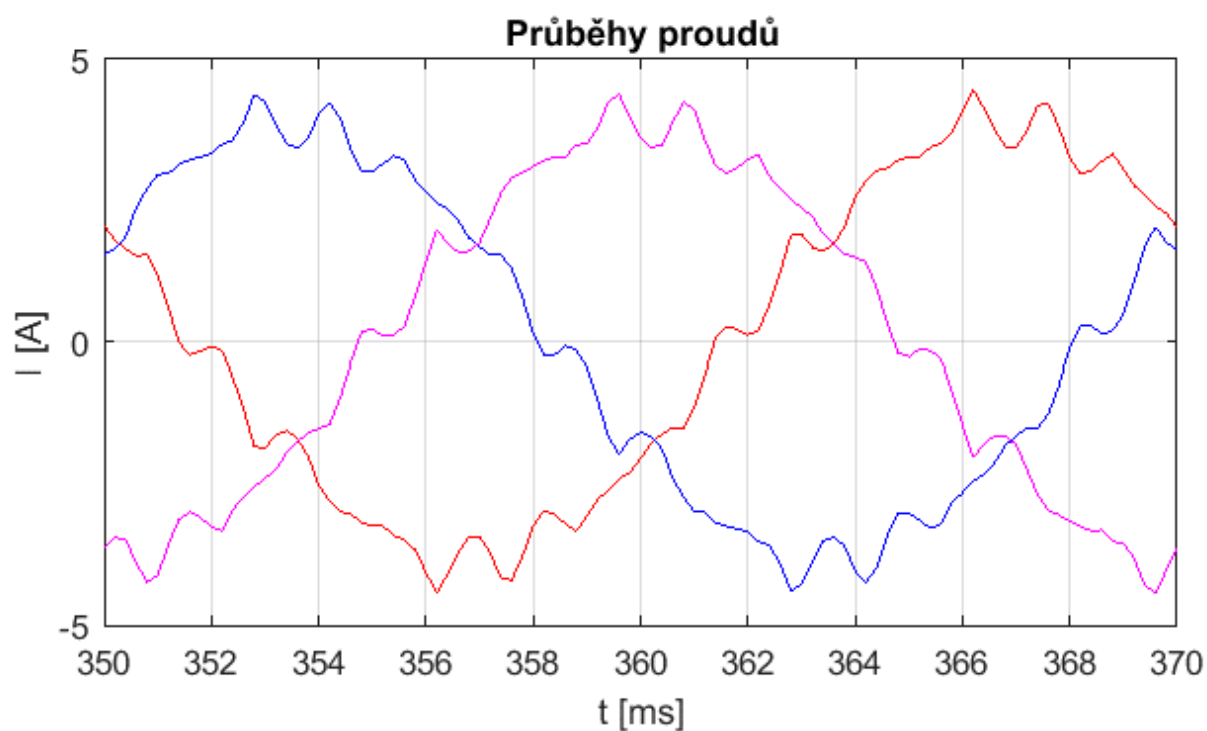


Obr. 5.11 Rozložení ztrát ve stroji

Na obr. 5.12 jsou zobrazeny průběhy ztrát v synchronním motoru spouštěného ze sítě v ustáleném synchronním stavu. Dodatečné a ventilační ztráty jsou konstantní. Ostatní ztráty kolísají kolem své střední hodnoty, přičemž největší rozkmit mají ztráty ve vinutí statoru. Ztráty ve vinutí statoru jsou závislé na proudu ve statoru. Průběhy proudů na jednotlivých fázích jsou zobrazeny na obrázku 5.13.

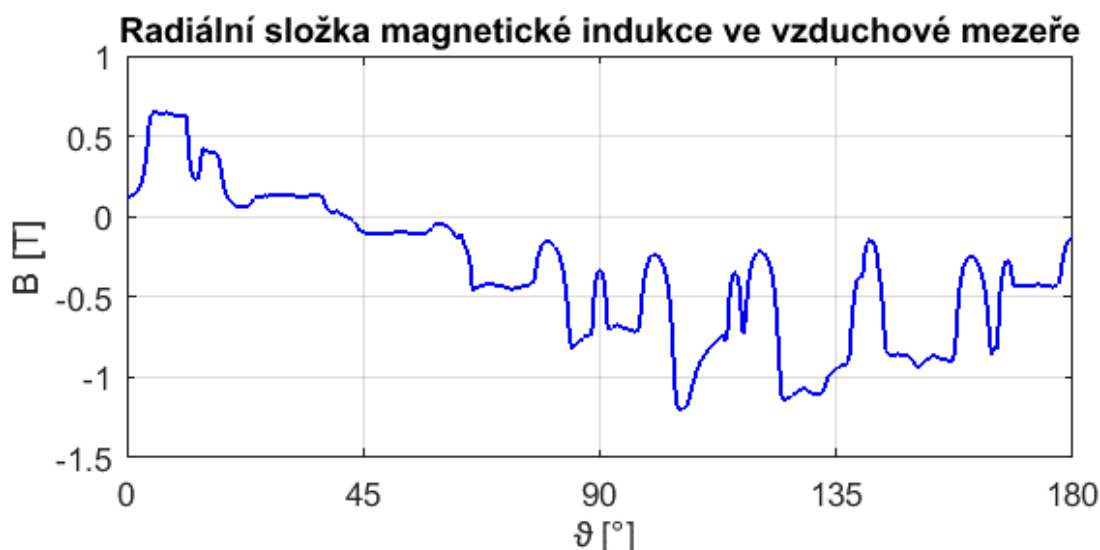


Obr. 5.12 Průběh ztrát ve stroji v ustáleném stavu

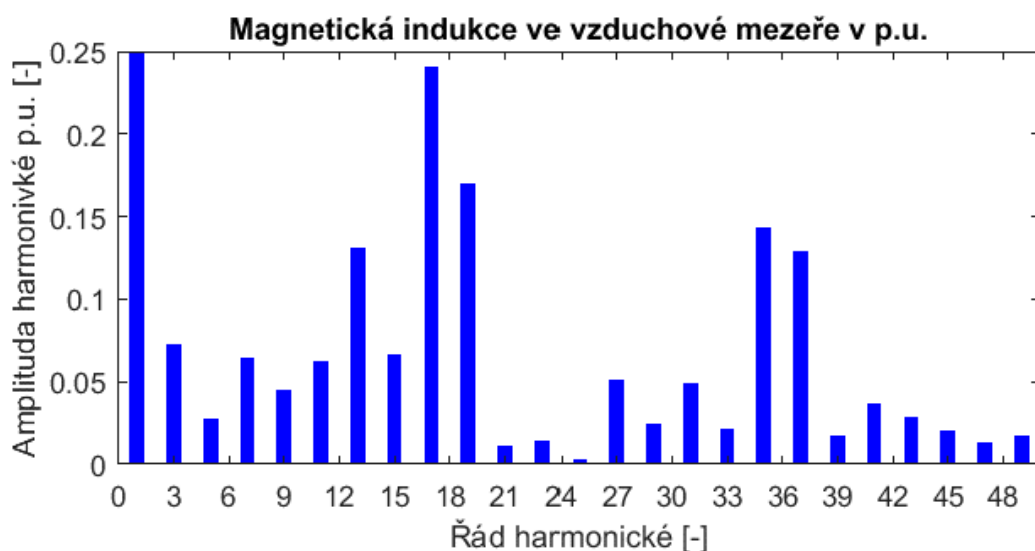


Obr. 5.13 Průběh proudu na jednotlivých fázích v ustáleném stavu

Na obr. 5.14 je zobrazen průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře při zatížení v závislosti na natočení. Magnetická indukce obsahuje vyšší harmonické stejně jako ve stavu naprázdno. Ovšem při zatížení se s magnetickým polem ve vzduchové mezeře vytvořeným permanentními magnety sčítá magnetické pole vytvořené od statorového vinutí procházeného proudem. Jak lze vidět magnetická indukce má sinusový tvar s výrazným obsahem harmonických.



Obr. 5.14 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře



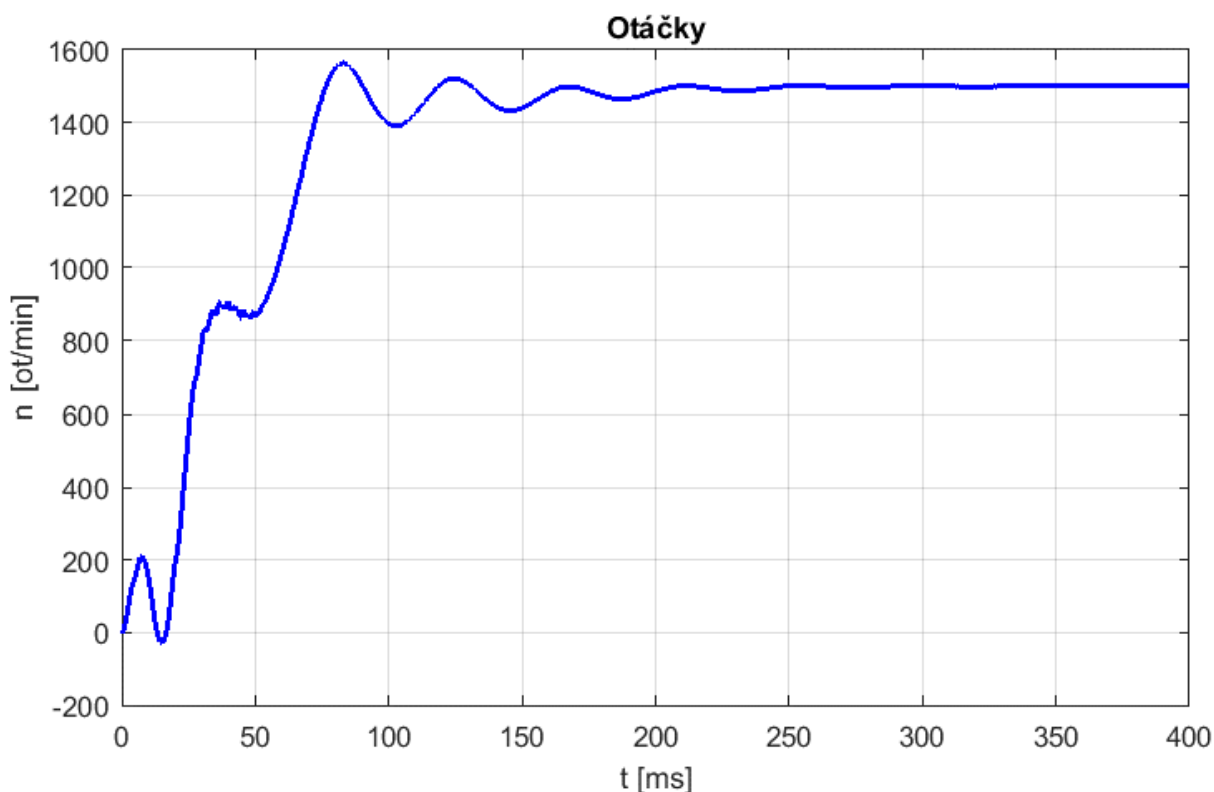
Obr. 5.15 FFT – analýza magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Výsledky provedené FFT analýzy pro průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře jsou zobrazené na obrázku 5.15. Amplitudy jednotlivých harmonických jsou vyneseny v poměrných jednotkách vztažených k první harmonické, která má absolutní hodnotu 0,726 T. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.1 vznikají zde harmonické, které závisí na geometrii rotoru, ty vznikají i při stavu naprázdno. V ustáleném stavu při zatížení se zde objeví

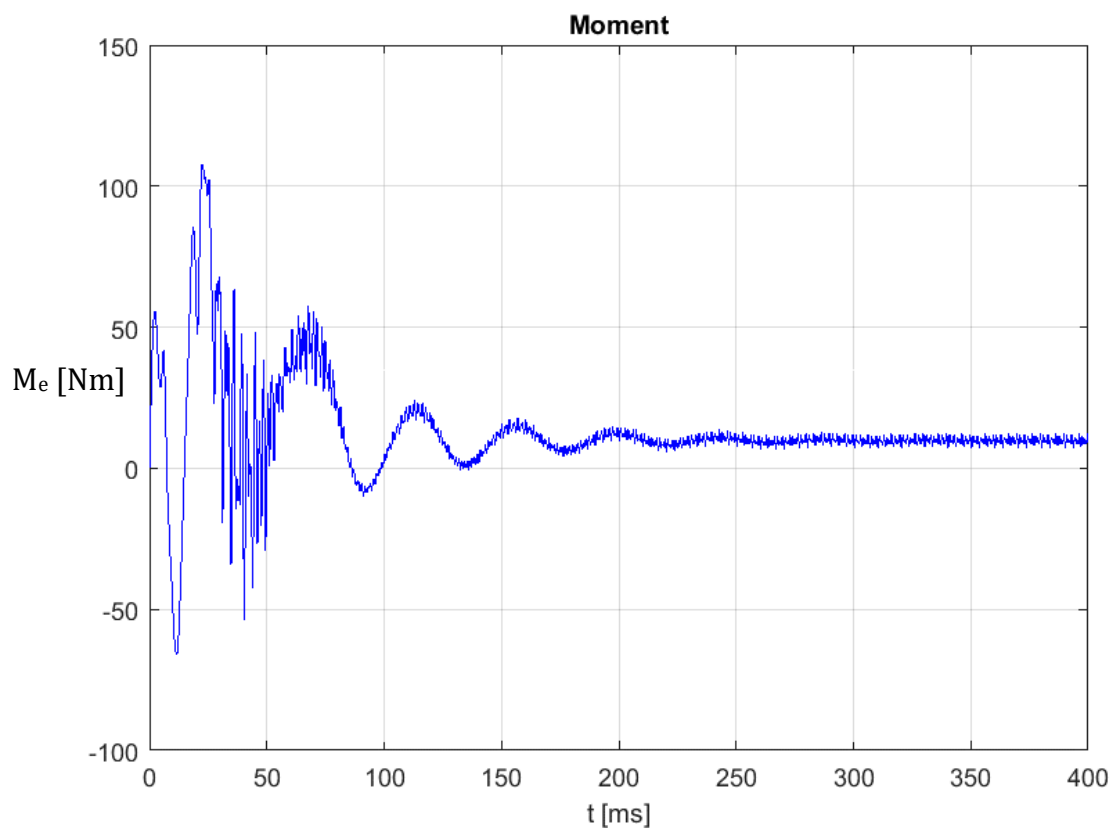
také vyšší harmonické, které jsou generovány proudem protékajícím ve statorovém vinutí. Tyto harmonické mají vždy u třífázových vinutí stejné řady: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43 a další vyšší harmonické [9]. V FFT analýze jde vidět, že se zde tyto harmonické vyskytují. Nejvýraznější je 17. harmonická, která tedy vzniká od třífázového vinutí, ale zároveň je také posilovaná geometrií statoru, neboť má stator 36 drážek. Tato 17. harmonická dosahuje amplitudou téměř 25 % první harmonické. Kvůli drážkám statoru je taktéž významná 19. harmonická, která je blízká osmnácti, což je právě polovina drážek statoru. Dále statorové zuby, které způsobují nárůst amplitud 37. a 35. Kvůli rotorovým tyčím je taktéž výrazná 27. harmonická. Očekáváme, že největší vliv na průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře budou mít vyšší harmonické, které dosahují aspoň 10 % amplitudy základní harmonické, což jsou: 13, 17, 19, 35 a 37 [9].

5.3 Rozběh stroje

Rozběh stroje je analyzován za účelem zjištění, zdali se stroj rozběhne i se zátěží a dále aby byly zjištěny průběhy jednotlivých veličin během rozběhu. Na obr. 5.16 je zobrazen průběh otáček stroje při rozběhu. Vidíme, že s mírným překmitem se od 100 ms otáčky začnou ustalovat na hodnotě 1500 otáček za minutu, až se úplně ustálí po 250 ms. Motor dosáhne synchronních otáček, proto můžeme říci, že se úspěšně rozběhl a dosáhl synchronního stavu. V obrázku 5.17 jde vidět průběh momentu při rozběhu stroje, který se po výrazných překmitcích ustálí ve stejném čase jako otáčky na hodnotě 9,83 Nm.

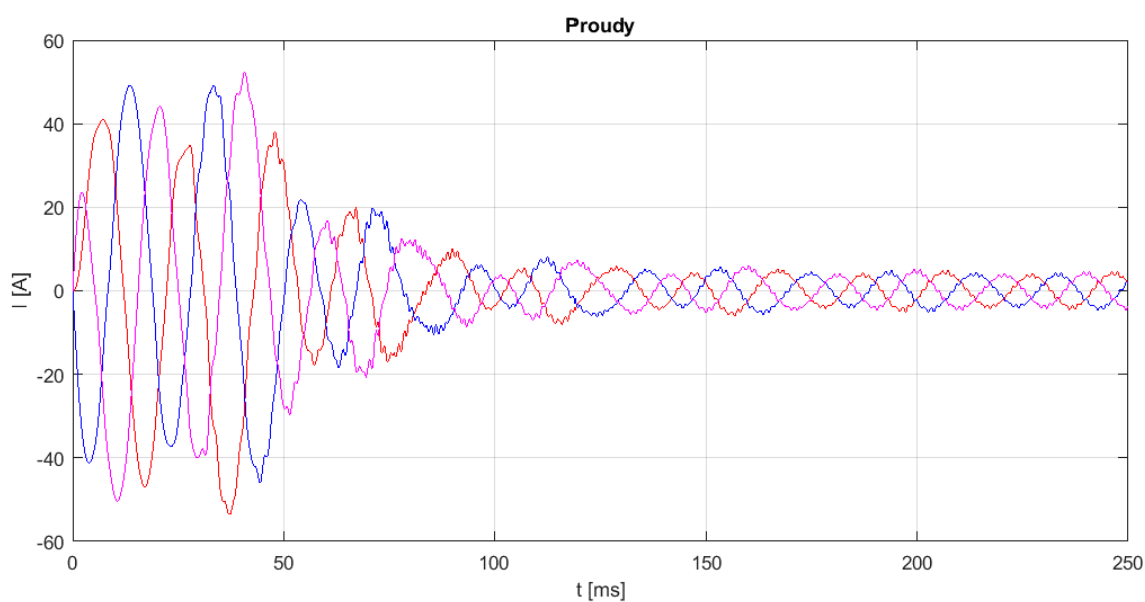


Obr. 5.16 Průběh otáček stroje při rozběhu stroje



Obr. 5.17 Průběh momentu při rozběhu stroje

Průběhy proudů v jednotlivých fázích při rozběhu stroje jsou vyneseny na obr. 5.18. Všechny fáze jsou přibližně souměrně zatížené a maximální hodnota proudu dosahuje 53,6 A, což je dvacetinásobek jmenovitého proudu.



Obr. 5.18 Průběhy proudů na jednotlivých fázích při rozběhu stroje

5.4 Porovnání výsledků získaných v RMxpřt a Maxwell

Poslední kapitola této práce porovnává získané výsledky v programech RMxpřt a Maxwell. Vybrané hodnoty jsou v tabulkách 5.7, 5.8 a 5.9. Z výsledků je zřejmý rozdíl mezi hodnotami z RMxpřt a Maxwell.

Tab. 5.7 Porovnání hodnot při jmenovitém výstupním výkonu z RMxpřt a Maxwell

Parametr	Jednotka	Maxwell	RMxpřt
Jmenovitý výstupní výkon	W	1 543,7	1 499,5
Jmenovitý moment	Nm	9,828	9,546
Otáčky	ot/min	1 500	1 500
Účinnost	-	0,888	0,945
Účinník	-	0,804	0,979
Vnitřní indukované napětí		214,767	-
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T	0,724	-

Tab. 5.8 Porovnání hodnot při stavu naprázdno z RMxpřt a Maxwell

Parametr	Jednotka	Maxwell	RMxpřt
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T	0,543	0,395
Indukované napětí naprázdno	V	165,269	147,460
Napěťová konstanta	V/1000 ot.min ⁻¹	190,836	170,272
Max. hodnota parazitního relukt. momentu	mNm	750,000	-

Tab. 5.9 Porovnání ztrát při jmenovitém výstupním výkonu z RMxpřt a Maxwell

Typ ztrát	Jednotka	Maxwell	RMxpřt
Ohmické ztráty ve statoru	W	87,508	48,768
Ztráty v železe	W	68,708	17,808
Ztráty v kleci rotoru	W	10,214	-
Dodatečné ztráty	W	9,217	-
Mechanické ztráty (ventilační)	W	20,000	20,000
Celkové ztráty	W	195,647	86,576

Při porovnání vypočtených ztrát ve stroji vidíme, že v RMxpřt jsou ztráty v kleci rotoru a dodatečné ztráty zanedbány. Dále Jouleovy ztráty ve vinutí statoru jsou v RMxpřt téměř o polovinu menší než v Maxwell, také ztráty v železe jsou v RMxpřt menší. Výsledné ztráty vypočtené v RMxpřt nenabývají ani poloviny celkových ztrát vypočtených v programu Maxwell. Tyto rozdíly mohou být způsobené tím, že RMxpřt neuvažuje syčení železa. Celkové ztráty v původním asynchronním motoru byly dle technické dokumentace stanoveny 287,2 W a původní odhad byl zmenšení ztrát přibližně o 16 % procent, tudíž předpokládaná hodnota ztrát v synchronním stroji spouštěném ze sítě je 241,3 W. Díky tomu můžeme říci, že ztráty vypočtené v Maxwell jsou důvěryhodnější nežli výsledky z RMxpřt.

V tabulce 5.8 jsou porovnány vypočtené hodnoty při stavu naprázdno, přičemž se zde opět vyskytují rozdíly. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře je v RMxpřt 0,395 T a v Maxwell 0,543 T. Jelikož RMxpřt neuvažuje sycení železa, měl by výpočet vést teoreticky k opačnému výsledku, tedy k vyšší magnetické indukci v RMxpřt oproti hodnotě v Maxwell. Protože neznáme metodiku analytického výpočtu v RMxpřt, nemůžeme přesně říci, proč nastal takovýto výsledek. Indukované napětí naprázdno bude pochopitelně také menší v RMxpřt než v Maxwell. Taktéž je v tabulce 5.8 uvedena maximální hodnota parazitního reluktančního momentu vypočtená pouze v Maxwell, neboť pomocí RMxpřt ji nelze zjistit.

V tabulce 5.7 jsou porovnány hodnoty při jmenovitém výstupním výkonu, který je v případě RMxpřt stanoven 1499 W a v případě Maxwell 1543,7 W. Jmenovitý moment taktéž vychází větší v programu Maxwell. Vidíme že, účinnosti se od sebe výrazně liší. V RMxpřt vychází účinnost 94,5 %, což je velmi optimistická hodnota. Maxwell vypočítal účinnost 88,8 %. Tato hodnota je již podstatně reálnější. Podobně je tomu tak u vypočtených účinností stroje. Maxwell navíc zvládne určit hodnotu vnitřního indukovaného napětí a magnetické indukce ve vzduchové mezeře při jmenovitém výstupním momentu, která byla vypočtena 0,724 T. V původním asynchronním motoru je dle technické dokumentace magnetická indukce ve vzduchové mezeře 0,703 T.

Porovnáním výsledků z RMxpřt a Maxwell jsme zjistili, že je mezi hodnotami zřejmý rozdíl. Vyhodnocení příčiny rozdílu je velmi obtížné, neboť metodika analytického výpočtu v RMxpřt ani Maxwell není známa. Nicméně na základě srovnání výsledků lze usoudit, že nástroj RMxpřt nemusí být kvůli svým nedostatkům vhodný pro výpočet synchronních strojů spouštěných ze sítě.

6 ZÁVĚR

Z této práce můžeme vyvodit, že synchronní stroj spouštěný ze sítě je vhodnou náhradou za asynchronní motory u pohonů pump, čerpadel, ventilátoru apod. Tato výměna vede ke zvýšení účinnosti pohonu, a tedy i k celkovému snížení spotřeby elektrické energie, na což je v současnosti kladen velký důraz.

Synchronní stroj spouštěný ze sítě má oproti asynchronnímu motoru lepší účinnost i účinník. LSPMSM se také při synchronním chodu neohřívá tolik jako AM. Dále má LSPMSM oproti AM vyšší proudovou hustotu výkonu, což je také velmi sledovaný parametr stroje. Největší nevýhodu má LSPMSM v náročné výrobě, a tedy i vyšší pořizovací ceně. Výroba je u strojů osahující PM složitá, neboť manipulace s permanentními magnety je velmi obtížná. Ovšem při dlouhodobém běhu LSPMSM jsou celkové náklady nižší než u asynchronních motorů s nižší pořizovací cenou.

Při návrhu LPMSM se často vychází z již navrhnutého AM, přičemž se mění pouze rotor stroje. Úprava rotoru se sestává především z přidání permanentních magnetů, přičemž je většinou preferováno uložení uvnitř rotoru, a změny klece takovým způsobem, aby v rotoru bylo vytvořeno dostatečné místo pro PM. Při návrhu je nutné zohlednit velikost PM, z důvodu rozběhu stroje. PM vytváří brzdny moment působící proti záběrnému momentu klece a je možné, že by motor nemusel dosáhnout potřebných synchronních otáček.

Navržený synchronní stroj spouštěný ze sítě byl analyzován dvěma různými nástroji: RMxprt a ANSYS Maxwell. Při porovnání výsledků bylo zjištěno, že RMxprt nemusí být nejvhodnější prostředek k analýze synchronních strojů spouštěných ze sítě. Proto při porovnání navrhnutého LSPMSM s původním AM jsou využity výsledky z Maxwell.

Tab. 6.1 Porovnání hodnot při jmenovitém výstupním výkonu z Maxwell a technické dokumentace původního asynchronního motoru

Parametr	Jednotka	LSPMSM	AM
Jmenovitý výstupní výkon	W	1 543,7	1 500
Jmenovitý moment	Nm	9,828	9,905
Otáčky	ot/min	1 500	1 446,2
Účinnost	%	88,80	83,93
Účinník	-	0,804	0,744

Tab. 6.2 Porovnání ztrát při jmenovitém výstupním výkonu z Maxwell a technické dokumentace původního asynchronního motoru

Typ ztrát	Jednotka	LSPMSM	AM
Ohmické ztráty ve statoru	W	87,508	139,8
Ztráty v železe	W	68,708	61,3
Ztráty v kleci rotoru	W	10,214	57,2
Dodatečné ztráty	W	9,217	8,9
Mechanické ztráty (ventilační)	W	20,000	20,000
Celkové ztráty	W	195,647	287,200

V tabulce 6.1 vidíme, že se nám podařilo splnit hlavní cíl, tedy navýšení účinnosti. Účinnost se zvýšila z 83,93 % na 88,80 %, čímž se motor posunul do třídy účinnosti IE4. V tabulce 6.2 je porovnání ztrát v LSPMSM a AM. Jak bylo očekáváno nejvíce se snížily ztráty v kleci rotoru, a to téměř o 80 % původních ztrát. Ohmické ztráty ve statoru se taktéž snížily, což má spojitost se snížením statorového proudu a vylepšením účinníku. Kvůli většímu sycení stroje při jmenovitém výstupním výkonu, se navýšily ztráty v železe. Celkově se dle výpočtu ztráty snížily skoro o 30 %, ale dalo by se předpokládat, že při reálném měření LSPMSM nebude tato hodnota tak vysoká, neboť původní odhad byl 20 %.

Nakonec zde je ještě srovnání našeho navrženého LSPMSM s dnes vyráběnými motory ve stejné třídě účinnosti, tedy IE4. Pro porovnání byly vybrány motory od společnosti WEG a SEW-EURODRIVE. Od společnosti SEW-EURODRIVE byl vybrán motor: DRU 90LJ 4 [13] a od společnosti WEG: WQuattro L90L [19].

Tab. 6.3 Porovnání hodnot navrženého LSPMSM s motory SEW a WEG

Parametr	Jednotka	LSPMSM	SEW	WEG
Jmenovitý výstupní výkon	W	1 543,7	1 500	1 500
Jmenovitý moment	Nm	9,828	9,500	9,500
Otáčky	ot/min	1 500	1 500	1 500
Účinnost	%	88,80	90,10	88,20
Účinník	-	0,804	0,86	0,74

Porovnáním navrženého o LSPMSM s motory SEW a WEG v tabulce 6.3 zjistíme, že navržený motor má lehce větší jmenovitý moment. Dále se účinností a účinníkem pohybuje mezi těmito dvěma vybranými motory. Z toho lze říci, že tento motor je dobře navržený a svými vlastnostmi je konkurence schopný na trhu.

Přínosem této práce je porovnání RMxpřt a Maxwell, přičemž bylo vyhodnoceno, že RMxpřt nemusí být nejvhodnějším nástrojem při analýze a návrhu LSPMSM. Dále je v této práci popsán postup návrhu LSPMSM. Na práci se dá smysluplně navázat porovnáním reálně naměřených výsledků na vyrobeném navrženém LSPMSM s teoretickými hodnotami výpočtu. Dále by součástí navazující práce mohl být tepelný výpočet stroje.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ELISTRATOVA, Vera. *Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency*. Electric power. Ecole Centrale de Lille, 2015. English. NNT: 2015ECLI0022.
- [2] FAJMONOVÁ, I. *Synchronní stroje spouštěné ze sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 39 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jan Bárta.
- [3] HASSANPOUR ISFAHANI, Arash a Sadegh VAEZ-ZADEH. *Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities*. *Energy* [online]. Elsevier, 2009, 34(11), 1755-1763 [cit. 2017-10-15]. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.022. ISSN 0360-5442.
- [4] HRABOVCOVÁ, Valéria a Miroslav LIČKO. *Reluktančný synchronný motor*. Žilina: EDIS, 2001, 229 stran : ilustrace. ISBN 80-7100-891-5.
- [5] MCELVEEN, Robbie, Mike MELFI a Roger DAUGHERTY. *Line start permanent magnet motors – Starting, standards and application guidelines*. In: Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2014 IEEE [online]. IEEE, 2014. DOI: 10.1109/PCICon.2014.6961876. ISBN: 978-1-4799-3054-8.
- [6] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vydavatelství ČVUT. 1993. ISBN 80-01-02106-2
- [7] *Motor development*. Institute for Electrical Energy Conversion, TU Darmstadt Německo, Presentace lekcí.
- [8] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. VUT, 79 s. Skriptum.
- [9] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-70162-1.
- [10] PYRHÖNEN, Juha, Valerii ABRAMENKO a Ilya PETROV. *Analysis of damper winding designs for direct-on-line synchronous reluctance motor*. Industrial Electronics Society, IECON 2017. ISBN: 978-1-5386-1127-2
- [11] RUAN, Tianhu, HAIPENG PAN a YONGMING XIA. *Design and analysis of two different line-start PM synchronous motors*. In: Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on [online]. IEEE Publishing, 2011. DOI: 10.1109/AIMSEC.2011.6009932. ISBN 978-1-4577-0535-9.
- [12] RÚRA, Dávid. *Programové riešenie návrhu asynchrónneho motora*. VUT FEKT v Brně, 2016. Semestrálna práca.
- [13] SEW-EURODRIVE. *Dodatek k návodu k obsluze*. Vydání září 2014. Dostupné z: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/21281939.pdf>
- [14] TJE MILLER. *SPEED's Electric Machines with problems and solutions*. 2014.

- [15] UGALE, R. T. a B. N. CHAUDHARI a S. BAKA. *Inset consequent and inset rotors for line start permanent magnet synchronous motor*. In: Electrical Machines (ICEM), 20. International Conference on [online], 2012. DOI: 10.1109/ICEIMach.2012.6349887.
- [16] UGALE, R. T. a B. N. CHAUDHARI. *A new rotor structure for line start permanent magnet synchronous motor*. In: Electric Machines & Drives Conference, 2013 IEEE International [online]. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556326. ISBN: 978-1-4673-4975-8.
- [17] UGALE, R. T. a B. N. CHAUDHARI. *Configurations for Improved Starting and Synchronous Performance of Line Start Permanent-Magnet Synchronous Motor*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on [online]. USA: IEEE. 2017. DOI: 10.1109/TIE.2016.2606587. ISSN: 0278-0046
- [18] UGALE, Rajaram Tukaram, Bhalchandra Nemichand CHAUDHARI a Ashutosh PRAMANIK. *Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors*. IET Electric Power Applications [online]. 2014, 8(4), 141-154 [cit. 2017-12-30]. DOI: 10.1049/iet-epa.2013.0241. ISSN 1751-8660
- [19] WEG. *WQuattro Super Premium Efficiency Motor*. Vydání červenec 2017. Dostupné z: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h01/hfc/WEG-w22-quattro-european-market-50025713-brochure-english-web.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka Popis

AM	Asynchronní motor
EMF	Electromotive force
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
FFT	Rychlá Fourierova analýzy
LSPMSM	Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor
PM	Permanentní magnety
SM	Synchronní motor
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symbol	Popis	Jednotka
B	magnetická indukce	[T]
B_r	remanentní magnetická indukce	[T]
B_{s0}	rozměr zubu rotoru	[m]
B_{s1}	rozměr zubu rotoru	[m]
B_{s2}	rozměr zubu rotoru	[m]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
f_1	frekvence napájecího napětí	[Hz]
f_{syn}	synchronní frekvence	[Hz]
H_c	koercitivní síla	[A/m]
H_{s0}	rozměr zubu rotoru	[m]
H_{s01}	rozměr zubu rotoru	[m]
H_{s1}	rozměr zubu rotoru	[m]
H_{s2}	rozměr zubu rotoru	[m]
I	proud statoru	[A]
I_b	přídavný statorový proud	[A]
i_{PM}	okamžitá hodnota vektoru proudu od permanentních magnetů	[A]
J	moment setrvačnosti roztáčené hmoty	[kgm ²]
J_{mot}	moment setrvačnosti motoru	[kgm ²]

$J_{\text{zát}}$	moment setrvačnosti zátěže	[kgm ²]
k	konstanta stroje	[-]
m	počet fází	[-]
M	asynchronní moment od klece motoru	[Nm]
M_b	brzdny moment	[Nm]
M_e	výsledný elektromagnetický moment	[Nm]
M_N	jmenovitý moment	[Nm]
$M_{p,0}$	maximální moment	[Nm]
$M_{\text{původní}}$	moment od původního asynchronního motoru	[Nm]
M_{rel}	reluktanční moment	[Nm]
M_{syn}	synchronní moment	[Nm]
$M_{\text{záb}}$	Záběrný moment	[Nm]
$M_{\text{zát}}$	zátěžný moment	[Nm]
n	otáčky motoru	[ot/min]
n_1	otáčky magnetického pole statoru	[ot/min]
n_n	jmenovité otáčky	[ot/min]
n_s	počet paralelních drátů	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
P	výkon motoru	[W]
$P_{p,0}$	maximální výkon	[W]
R_D	odpor rotorového vinutí přepočtený na stator	[Ω]
R_s	rozměr zubu rotoru	[m]
R_s	odpor statorového vinutí	[Ω]
s	skluz	[-]
s_{cri}	kritický skluz	[-]
$\sin\vartheta$	zátěžný úhel	[°]
t	čas	[s]
U_0	indukované napětí naprázdno	[V]
U_i	vnitřní indukované napětí	[V]

U_s	napětí statoru	[V]
X_d	synchronní reaktance v d-ose	[Ω]
X_q	synchronní reaktance v q-ose	[Ω]
X_{rD}	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator	[Ω]
X_{rs}	rozptylová reaktance statoru	[Ω]
α	mechanický stupeň	[°]
γ_r	rotorový úhel	[°]
δ	délka vzduchové mezery	[m]
η	účinnost	[-]
ϑ	elektrický stupeň	[°]
ψ_{PM}	spřažený tok od permanentních magnetů	[Wb]
ω	rotorová elektrická úhlová rychlost	[rads ⁻¹]
ω_{syn}	synchronní úhlová rychlost	[rads ⁻¹]